



Catarina Rocha e Silva O EFEITO DA VENTILAÇÃO NATURAL NA
Valente de Matos QUALIDADE DO AR INTERIOR E NA EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA DOS EDIFÍCIOS



**Catarina Rocha e Silva
Valente de Matos**

**O EFEITO DA VENTILAÇÃO NATURAL NA
QUALIDADE DO AR INTERIOR E NA EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA DOS EDIFÍCIOS**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Sistemas Energéticos Sustentáveis, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor Carlos Borrego, Professor Catedrático do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro e co-orientação da Doutora Ana Margarida Costa.

o júri

presidente

Professor Doutor Luís António da Cruz Tarelho
Professor Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

vogal
arguente principal

Professor Doutor Nelson Amadeu Dias Martins
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

vogal
orientador

Professor Doutor Carlos Alberto Diogo Soares Borrego
Professor Catedrático do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

vogal
co-orientadora

Doutora Ana Margarida Lobo Lourenço da Costa
Estagiária de Pós – Doutoramento do Laboratório Associado do Centro de Estudos do Ambiente e do Mar (CESAM) da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Mais uma conquista na minha vida... Uma etapa ultrapassada com muito trabalho e dedicação, que contou com a colaboração, consciente ou inconsciente, de algumas pessoas, as quais gostaria de destacar o meu agradecimento.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor Doutor Carlos Borrego, pelos saberes, experiências e conhecimento que me incutiu e transmitiu, revelando uma ferramenta primordial à execução deste trabalho, pelas críticas construtivas e sugestões essenciais realizadas durante a orientação e por toda a disponibilidade e compreensão. Também, à minha co-orientadora, Doutora Ana Margarida Costa, pela abertura de espírito revelada desde o primeiro contacto e a sua permanente disponibilidade, pelos conhecimentos, revisões e experiências partilhadas e pela força, motivação, ajuda e compreensão demonstradas durante a realização da tese. Mesmo muito obrigada!

Quero agradecer ao Engenheiro Pedro Cascão pela a colaboração e prontidão. À Doutora Cristina Sarmento pela colaboração e apoio na campanha experimental.

Ao Engenheiro João Ginja e ao Engenheiro Emanuel Sá por todos os esclarecimentos e apoio prestados.

Aos meus amigos e colegas, pelo constante apoio e partilha de experiências positivas.

Para finalizar, quero dedicar este trabalho e mostrar o meu agradecimento às pessoas mais importantes da minha vida, nomeadamente aos meus pais, irmã, namorado e toda a minha família.

Aos meus pais e irmã por toda a compreensão, apoio e carinho incondicionais que demonstraram nesta e noutras etapas da minha vida, por me acompanharem e contribuírem para o meu progresso académico e para a minha evolução pessoal, e por me terem incutido valores que fazem de mim uma pessoa vitoriosa.

Ao Gabriel por toda a motivação e encorajamento que me transmitiu para terminar esta etapa, pela paciência, compreensão e partilha demonstradas nos momentos mais atribulados deste trabalho, por todo o amor e carinho, e por me fazer sentir a pessoa mais feliz do mundo.

palavras-chave

Ventilação natural, taxa de ventilação, qualidade do ar interior, eficiência energética.

resumo

Actualmente o edifício não é apenas um invólucro que serve para proteger os seus ocupantes de condições adversas, mas também como um espaço integrante do seu dia a dia, visto que se despende cerca de 90% do tempo em ambientes interiores.

Por essa razão os edifícios devem adoptar estratégias e mecanismos para garantir um ambiente interior saudável, confortável e eficiente. É a pensar nestas três vertentes que a ventilação natural desenvolve um papel fundamental no controlo dos níveis de poluição no interior dos edifícios e na distribuição do fluxo de ar.

Para compreender como é que estas vertentes se associam é proposta a realização de uma campanha experimental no interior de um edifício, nomeadamente, numa sala de aula e num gabinete do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro. Esta campanha experimental contribuiu para a monitorização dos poluentes interiores e exteriores, determinação das taxas de ventilação e análise energética. A utilização do modelo energético EnergyPlus verificou-se uma ferramenta muito útil na simulação do caso de estudo e na análise de diferentes cenários e/ou estratégias de ventilação natural. Através da campanha experimental e da simulação energética foi constatado, no caso de estudo, uma QAI e conforto térmico carentes, essencialmente nos períodos de ocupação que poderão ser ajustados com estratégias de ventilação natural.

keywords

Natural Ventilation, rate airflow, indoor air quality, energy saving.

abstract

Currently the building is not only used to protect their occupants from adverse conditions, but also as a day-to-day integrant space, since we spend about 90% of ours time in indoor area. That is why the buildings should adopt strategies and mechanisms to ensure a healthy, comfortable and efficient indoor environment. It is thought these three sources that natural ventilation is a key role in monitoring of pollution levels inside buildings and the distribution of air flow.

To understand how these sources are associated is propose make an experimental campaign on indoor building, particularly in the classroom and an office of the Department of Environment and Planning in University of Aveiro. This experimental campaign contributed to the monitoring of indoor and outdoor pollutants, determination of the ventilation rates and energy analysis. The recurrence of energy model, EnergyPlus, was a very useful tool in the simulation of study case and analysis a different scenes and/or strategies for natural ventilation. Through the experimental campaign and energy simulation it was evidenced, in the study case, a poor IAQ and thermal comfort, mainly during occupation periods, which can be adjusted with strategies of the natural ventilation.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	iii
ÍNDICE DE TABELAS.....	vii
NOMENCLATURA	ix
1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1. Estado de arte.....	16
1.2. Objectivos.....	19
2. VENTILAÇÃO NATURAL NOS EDIFÍCIOS	21
2.1. Fundamentos da ventilação natural.....	23
2.1.1. Características do vento e o seu efeito nos edifícios	23
2.1.2. Clima interior	24
2.2. Potencialidades da ventilação natural.....	31
2.2.1. Qualidade do ar interior.....	32
2.2.2. Conforto térmico.....	35
2.2.3. Análise do consumo energética nos edifícios	38
2.3. Análise dos documentos legislativos	39
2.4. Modelos energéticos.....	43
3. CAMPANHA EXPERIMENTAL.....	47
3.1. Monitorização de parâmetros a medir.....	47
3.1.1. Taxas de ventilação.....	47
3.1.2. Qualidade do ar interior.....	51
3.1.3. Conforto térmico.....	51
3.1.4. Clima externo.....	52
3.1.5. Análise energética	52
3.2. Descrição da campanha experimental.....	52
3.2.1. Caracterização do edifício.....	53
3.2.2. Caracterização das zonas de amostragem	53
3.2.3. Caracterização dos pontos de amostragem interior.....	55
3.3. Metodologia	55
3.3.1. Medição e regulação das taxas de ventilação	56
3.3.2. Monitorização da QAI.....	58
3.3.3. Conforto térmico.....	62
3.3.4. Análise energética	63
3.3.5. Síntese dos parâmetros monitorizados.....	63
3.4. Resultados experimentais	63
3.4.1. Taxas de ventilação.....	64
3.4.2. Avaliação da QAI.....	66
3.4.3. Conforto térmico.....	73
3.4.5. Análise energética	76
3.4.6. Clima exterior	76
3.5. Conclusão	77
4. MODELAÇÃO NUMÉRICA DA QAI E DO CONSUMO ENERGÉTICO.....	79
4.1. Ficheiro de entrada	79
4.2. Definição do domínio.....	80
4.3. Resultados.....	81
4.3.1. Taxas de ventilação.....	81
4.3.2. Transporte de poluentes e QAI.....	82
4.3.3. Conforto térmico.....	85

4.3.4.	Análise energética	85
4.4.	Conclusão	87
5.	DEFINIÇÃO DE ESTRATÉGIAS PARA UM EDIFÍCIO SUSTENTÁVEL	89
5.1.	Resultados da modelação numérica.....	89
5.2.	Conclusão	94
6.	CONCLUSÃO	97
7.	BIBLIOGRAFIA.....	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema representativo das componentes de um edifício sustentável.	15
Figura 2. Mecanismos físicos da ventilação natural [Costa <i>et al.</i> , 2008].	22
Figura 3. Circulação do vento em torno de um obstáculo isolada [Santamouris <i>et al.</i> , 1998].	24
Figura 4. Os fenómenos físicos e as associações num compartimento [Santamouris <i>et al.</i> , 1998].	25
Figura 5. Balanço energético de uma zona ou compartimento [Santamouris <i>et al.</i> , 1998].	26
Figura 6. Balanço térmico da superfície de uma determinada zona [Santamouris <i>et al.</i> , 1998].	28
Figura 7. Efeito de chaminé [Santamouris <i>et al.</i> , 1998].	30
Figura 8. O efeito da ventilação natural na qualidade do ar interior [Santamouris <i>et al.</i> , 1998].	33
Figura 9. Variáveis ambientais e o seu efeito no conforto térmico [Santamouris <i>et al.</i> , 1998].	36
Figura 10. Evolução integrada do grau de poluição e do consumo de energia [Santamouris <i>et al.</i> , 1998].	39
Figura 11. Estrutura do EnergyPlus [URL 3].	45
Figura 12. Simulação integrada do EnergyPlus [URL 3].	45
Figura 13. Métodos colectores de informação na ventilação [Santamouris <i>et al.</i> , 1998]. ...	47
Figura 14. Medição da taxa de ventilação utilizando as técnicas activas do gás traçador [Santamouris <i>et al.</i> , 1998].	49
Figura 15. Edifício em estudo (Fonte: URL11).	53
Figura 16. Esquema da localização dos locais e zonas de amostragem (Fonte: URL 11)	54
Figura 17. Locais de amostragem.	54
Figura 18. Laboratório móvel de qualidade do ar.	55
Figura 19. Esquema experimental do sistema do gás traçador.	57
Figura 20. Análises microbiológicas nas respectivas zonas de amostragem.	61
Figura 21. Contagem de colónias após 7 dias de incubação.	61
Figura 22. Código de cores e formas para o gabinete e a sala de aula.	64
Figura 23. Medição do gás traçador (GT) no dia 4 de Março, na sala de aula.	65
Figura 24. Medição do gás traçador (GT) no dia 6 de Março, na sala de aula.	65
Figura 25. Determinação das taxas de ventilação pelas concentrações de CO ₂ em comparação com as taxas obtidas com o método do gás traçador (sala de aula).	66
Figura 26. Evolução da concentração dos COV's totais no gabinete, em comparação com a concentração de referência e de BETX no exterior.	67
Figura 27. Evolução da concentração de CO ₂ no gabinete, em comparação com a concentração de referência.	67
Figura 28. Evolução da concentração de O ₃ no gabinete, em comparação com a concentração de referência e no exterior.	68
Figura 29. Evolução da concentração de CO no gabinete, em comparação com a concentração no exterior.	68
Figura 30. Evolução da concentração de HCHO no gabinete, em comparação com a concentração de referência e no exterior.	68
Figura 31. Evolução da concentração de bactérias no gabinete, em comparação com a concentração de referência e no exterior.	69
Figura 32. Evolução da concentração de fungos no gabinete, em comparação com a concentração de referência e no exterior.	69

Figura 33. Evolução da concentração de CO ₂ na sala de aula, em comparação com a concentração de referência.....	70
Figura 34. Concentrações efectivas de CO ₂ na sala de aula.....	71
Figura 35. Evolução da concentração de O ₃ na sala de aula, em comparação com a concentração de referência e no exterior.....	71
Figura 36. Evolução da concentração de CO na sala de aula, em comparação com a concentração no exterior.	72
Figura 37. Evolução da concentração de bactérias na sala de aula, em comparação com a concentração de referência e no exterior.....	72
Figura 38. Evolução da concentração de fungos na sala de aula, em comparação com a concentração de referência e no exterior.....	73
Figura 39. Evolução da temperatura no gabinete em comparação com a temperatura referência e no exterior.....	73
Figura 40. Evolução da humidade no gabinete em comparação com a humidade referência e no exterior.	74
Figura 41. Evolução da temperatura na sala de aula em comparação com a temperatura referência e no exterior.....	74
Figura 42. Evolução da humidade na sala de aula em comparação com a humidade referência e no exterior.....	75
Figura 43. Velocidade e direcção do vento durante a campanha experimental.....	77
Figura 44. Modelo EnergyPlus e respectivo ficheiro de entrada.	80
Figura 45. Modelo Energy Plus e respectivo ficheiro de entrada.	80
Figura 46. Representação do domínio de simulação.	81
Figura 47. Taxas de ventilação para o gabinete.	82
Figura 48. Taxas de ventilação para a sala de aula.....	82
Figura 49. Transporte de COV's totais do exterior para o interior.	83
Figura 50. Comparação das concentrações de O ₃ transportadas do exterior para o interior com e sem linha de referência, com as concentrações experimentais.....	83
Figura 51. Comparação das concentrações de CO transportadas do exterior para o interior com as concentrações experimentais.....	84
Figura 52. Concentrações de CO transportadas do exterior para o interior com e sem linha de referência.	84
Figura 53. Comparação das variáveis de controlo obtidas no modelo, com as experimentais e de referência.....	85
Figura 54. Consumo energético pelo sistema de aquecimento no gabinete e na sala.....	86
Figura 55. Taxas de ventilação de acordo com os vários cenários, para a sala de aula.....	90
Figura 56. Taxas de ventilação de acordo com os vários cenários, para o gabinete.....	90
Figura 57. Dados relativos ao transporte de O ₃ para os vários cenários.....	91
Figura 58. Dados relativos ao transporte de PM10 para os vários cenários.	91
Figura 59. Comportamento da temperatura de acordo com vários cenários, para a sala de aula.	92
Figura 60. Comportamento da temperatura de acordo com vários cenários, para o gabinete.....	92
Figura 61. Comportamento da humidade de acordo com vários cenários, para a sala de aula.	92
Figura 62. Comportamento da humidade de acordo com vários cenários, para o gabinete.	93
Figura 63. Consumo de energia térmica de acordo com os vários cenários, para a sala. ...	94
Figura 64. Consumo de energia térmica de acordo com os vários cenários, para o gabinete.	94

Figura 65. Concentração das PM10 no exterior.	109
Figura 66. Concentração dos óxidos de azoto no exterior.....	109
Figura 67. Transporte de óxidos de azoto do exterior para o exterior.	109

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Paradigma dado pela filosofia da ventilação e QAI desde 1800 [Fanger, 1996].	32
Tabela 2. Fontes e características físico-químicas dos poluentes englobados no índice de qualidade do ar [Hansen <i>et al.</i> , 2004; EPA, 2008].....	34
Tabela 3. Directivas da EU que incluem aspectos da QAI e do desempenho energético dos edifícios.	39
Tabela 4. Regulamentos nacionais relativos ao desempenho energético dos edifícios e QAI [ADENE, 2009].	41
Tabela 5. Concentrações máximas de referência dos poluentes no interior dos edifícios existentes estabelecidas no RSECE.	41
Tabela 6. Caudais mínimos de ar novo estabelecidos no RSECE.....	42
Tabela 7. Condições de conforto de referência para ambientes interiores estabelecidas no RCCTE.....	43
Tabela 8. Modelos de simulação energética.	44
Tabela 9. Características principais dos gases mais comuns utilizados como gás traçador. [Etheridge <i>et al.</i> , 1996].....	48
Tabela 10. Métodos activos do gás traçador para a determinação das taxas de ventilação [Santamouris <i>et al.</i> , 1998].....	49
Tabela 11. Parâmetros de caracterização do edifício em estudo.....	53
Tabela 12. Parâmetros de caracterização do Laboratório Móvel de Qualidade do Ar.....	55
Tabela 13. Métodos e equipamentos de monitorização e respectivas características para a medição dos poluentes considerados nos termos do RSECE.....	58
Tabela 14. Método de colheita dos microorganismos e respectivas características.	59
Tabela 15. Caracterização do equipamento de colheita.....	60
Tabela 16. Caracterização da colheita dos microorganismos.	60
Tabela 17. Temperatura de incubação dos microorganismos.	61
Tabela 18. Métodos e equipamentos de monitorização e respectivas características para a medição da temperatura e humidade.....	62
Tabela 19. Tipo de analisador para cada poluente considerado.	62
Tabela 20. Monitorização da QAI.	63
Tabela 21. Cálculo da taxa de ventilação total para o dia 4 de Março.	65
Tabela 22. Cálculo da taxa de ventilação total para o dia 6 de Março.....	65
Tabela 23. Síntese dos resultados experimentais obtidos para a QAI e para o Conforto Térmico.	75
Tabela 24. Análise estatística dos valores experimentais e simulados.	85
Tabela 25. Consumos de Energia Eléctrica.	86
Tabela 26. Cenários de estratégias de ventilação natural.	89

NOMENCULATURA

A	Área	$[m^2]$
cp	Calor específico	$[J.kg^{-1}.K^{-1}]$
U	Velocidade do escoamento	$[m^{-2}.s^{-1}]$
E	Poder emissivo	$[W.m^{-2}]$
g	Aceleração da gravidade	$[m.s^{-2}]$
h	Coeficiente de transferência de calor por convecção	$[W.m^{-2}.K^{-1}]$
k	Condutividade térmica	$[W.m^{-1}.K^{-1}]$
\dot{m}	Caudal mássico	$[kg. s^{-1}]$
Q	Caudal volúmico	$[m^3. s^{-1}]$
P	Pressão	$[Pa]$
q	Taxa de transferência de calor	$[W]$
q''	Fluxo de calor	$[W. m^{-2}]$
T	Temperatura	$[K]$
V	Volume	$[m^3]$
ρ	Massa volúmica	$[kg.m^{-3}]$
G	Irradiação	$[W.m^{-2}]$
H	Altura do obstáculo	$[m]$
z	Altura acima do solo	$[m]$
δ_p	Coeficientes de pressão	$[-]$
C_d	Coeficiente de descarga	$[-]$
a	Difusividade térmica do material	$[-]$
n	Normal à superfície	$[-]$
C	Concentração	$[m^3.m^{-3}]$
F	Caudal de gás traçador injectado	$[kg. s^{-1}]$
t	Tempo	$[s]$
N	Taxa de renovação	$[s^{-1}]$

ABREVIATURAS

QAI	Qualidade do Ar Interior
EU	União Europeia
SED	Síndrome do Edifício Doente
OMS	Organização Mundial da Saúde
CFCs	Clorofluorcarbonetos
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
CFD	Computacional Fluids Dynamics
ES	Energy Simulation
EP	Energy Plus
UE	União Europeia
RSECE	Regulamento dos Sistemas Energéticos e de Climatização dos Edifícios
RCCTE	Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios
PM	Partículas
COV's	Compostos Orgânicos Voláteis
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
PFT	Perfluorcarbono

1. INTRODUÇÃO

As primeiras preocupações relacionadas com a temática do consumo energético dos edifícios iniciaram-se em 1973 com a crise do petróleo. Até este período, em todos os países ocidentais, especialmente na Europa, não existiam políticas nem preocupações ao nível do uso racional de energia nos edifícios, devido a esta apresentar um baixo custo. Como resultado dessa crise verificou-se um aumento do custo da energia que implicou uma redução significativa do seu consumo global nos edifícios, nomeadamente da resultante da utilização de sistemas de aquecimento e ar condicionado, negligenciando o seu impacto no conforto e saúde dos ocupantes do edifício. As políticas energéticas definidas neste período focalizaram-se, assim, no aumento do isolamento do edifício, reduzindo as infiltrações de ar. Se por um lado estas infiltrações eram responsáveis pelo aumento da factura energética, por outro eram fundamentais para a promoção da ventilação do edifício, diluindo a concentração dos poluentes e obtendo, conseqüentemente, uma melhor qualidade do ar interior (QAI). Como resultado destas políticas verificaram-se o aumento da humidade e o desenvolvimento de bolores e fungos, que afectaram a saúde dos ocupantes do edifício, o sobreaquecimento no Verão ou nas estações intermédias, que prejudicou o conforto térmico e o empobrecimento da QAI, devido às baixas taxas de renovação de ar, provocando um impacto na produtividade e no comportamento dos seus ocupantes.

Em 1980 surgiram as primeiras preocupações acerca das consequências dos primeiros regulamentos da conservação da energia, que apenas davam ênfase à redução do seu consumo [Santamouris *et al.*, 1998]. Dessas consequências resultou o aparecimento do conceito “Síndrome do Edifício Doente” (SED), que pode resultar, quer de um nível de ventilação insuficiente, quer de uma carga de poluente químico (proveniente do exterior ou interior do edifício) ou biológico (pólenes, bactérias e vírus) mais elevada. Estes elementos podem actuar combinados ou podem resultar de outras componentes, como temperatura, humidade e iluminação inadequadas. Este síndrome é um problema que se verifica em edifícios em que o número significativo de ocupantes apresenta problemas de saúde e desconforto (por exemplo: dores de cabeça; irritações nos olhos, nariz ou garganta; tosse seca; pele seca ou irritada; tonturas ou náuseas; dificuldade de concentração; fadiga; e sensibilidade para odores; ou outros sintomas desconhecidos) atribuíveis à qualidade de ar interior e cuja sintomatologia desaparece ou reduz significativamente quando estes se afastam desse edifício. A Organização Mundial da Saúde (OMS) estimou que mais de 30% dos edifícios novos ou renovados do mundo inteiro são afectados por problemas relativos à qualidade do ar interior, em condições temporárias ou

até longas [URL 1]. Por vezes os problemas de qualidade do ar resultam de um projecto do edifício carente ou das actividades dos ocupantes [Sharpe, 2004]. Este síndrome trouxe a preocupação de muitos investigadores, políticos, engenheiros e designers, e lembrou-lhes que a primeira função do edifício é a de proteger os seus ocupantes contra as intempéries climáticas do exterior, garantindo um ambiente saudável e confortável. Num contexto global, em 1990 inicia-se a era da “eficiência energética”. Nesta mudança ficou claro que a conservação da energia não se pode dissociar do ambiente interior e exterior e que o conceito global de um edifício surge associado aos aspectos ambientais. Estes aspectos apelam à necessidade de uma integração total das características locais, do design e da orientação do edifício, para que se possa levar a cabo a aplicação de técnicas passivas para o seu aquecimento, arrefecimento, ou melhor, para a sua climatização interior. Numa visão integrada de todos estes conceitos surge o edifício sustentável ou verde, baseado numa construção sustentável. A definição mais aceite foi a apresentada por Charles Kibert em 1994, que define a construção sustentável como a “criação e gestão responsável de um ambiente construído saudável, tendo em consideração os princípios ecológicos (para evitar danos ambientais) e a utilização eficiente dos recursos” [Paul *et al*, 2007].

Os edifícios sustentáveis são aqueles que proporcionam um ambiente saudável e digno a todos os seus ocupantes, tendo em vista a satisfação das suas necessidades sem prejudicar a capacidade dos sistemas ambientais de satisfazerem as necessidades das gerações futuras. Esta sustentabilidade deve ser conseguida ao nível ecológico, económico, social e cultural. A sustentabilidade ecológica visa principalmente a preservação dos recursos energéticos e materiais e a protecção dos ecossistemas dos problemas actuais e futuros. A sustentabilidade económica pode ser obtida através de uma exploração dos recursos adequada e consciente e de uma diminuição do custo global, através da minimização do custo da energia, do custo de operação e manutenção, e do custo de uma eventual recuperação dos edifícios. Por último, a sustentabilidade social e cultural pretende proteger os seres humanos, otimizar o conforto e a saúde dos ocupantes e construtores do edifício, desencorajar a exclusão social, e preservar os valores sociais e económicos [EC, 2003]. Tendo em vista estes níveis de sustentabilidade e o ambiente urbano no qual estão inseridos, a construção sustentável assenta em três grandes pilares, a eficiência energética, relacionada com a redução do consumo de energia, o conforto térmico dos ocupantes de um edifício e a qualidade do ar interior, como é demonstrado na Figura 1.

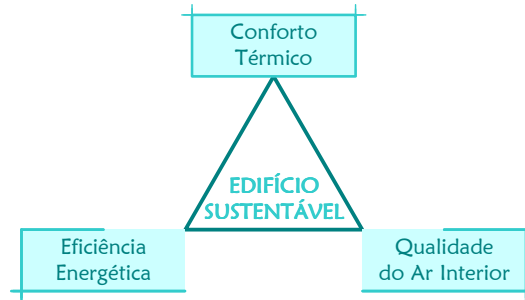


Figura 1. Esquema representativo das componentes de um edifício sustentável.

A eficiência energética desempenha um papel fundamental nas políticas energéticas europeias, nomeadamente na melhoria da segurança no abastecimento da energia, no reforço da competitividade das empresas europeias e na satisfação dos compromissos de Quioto para a redução dos gases com efeito de estufa. Na Europa o sector da construção é responsável por mais de 40% do consumo de energia final, onde cerca de um terço desta procura pode ser atribuída aos edifícios não residenciais, tais como escritórios, fábricas, escolas, hospitais ou hotéis. Ao mesmo tempo, podem representar um dos maiores potenciais de poupança energética, que pode ser explorada através da melhoria dos sistemas de aquecimento e refrigeração dos edifícios, da procura de sistemas de iluminação e equipamentos mais eficientes, da aplicação de energias renováveis, e da optimização do invólucro do edifício. Assim, para levar a cabo estes objectivos e a economia de energia é necessário um grande esforço por parte de todos os europeus, particularmente das organizações privadas e públicas [EC, 2003].

De acordo com o programa voluntário “Green Building” [URL 2], iniciado pela Comissão Europeia em 2005, é pretendido o aumento da sensibilização e informação, e o desencadeamento de investimentos adicionais na área da eficiência energética e das energias renováveis nos edifícios não residenciais, para que resultem economias significativas de energia. Estas poupanças não só contribuirão para a mitigação das alterações climáticas, como também para o desenvolvimento e competitividade empresarial, devido à redução de consumos e custos energéticos. Alguns casos de sucesso da implementação deste programa dizem respeito a edifícios construídos ou renovados, onde foram tidos em conta vários parâmetros:

- ❖ Optimização no invólucro do edifício (fachadas ventiladas, dispositivos de sombreamento móveis e automatizados, elevados níveis de insolação, etc.);
- ❖ Produção e distribuição de calor e frio;

- ❖ Implementação de um sistema de iluminação altamente eficiente e de equipamentos eléctricos de baixo consumo;
- ❖ Utilização da energia solar para o aquecimento (solar térmico) e produção de electricidade (solar fotovoltaica);
- ❖ Optimização e controlo da QAI e da taxa de renovação de ar através de sistemas de ventilação e sensores de ar;
- ❖ Utilização de um sistema centralizado de gestão de energia, para adaptar o consumo de energia à carga térmica do edifício a cada momento [Programa “Green Building”, 2006].

As questões da QAI e da energia aparecem intrinsecamente associadas às estratégias de ventilação implementadas no edifício, responsáveis pelo transporte dos poluentes do exterior para o seu interior e pela diluição dos poluentes com origem no seu interior.

1.1. Estado de arte

As estratégias de ventilação podem influenciar significativamente a concentração dos poluentes no interior como também as necessidades energéticas dos edifícios. Deste modo, as características do ar exterior e a capacidade de diluição do ar ventilado são determinantes para a concentração dos poluentes no interior, e consequentemente, para a quantidade de energia requerida para os manter com concentrações desejadas. A QAI requerida pode ser obtida através da aplicação de várias estratégias de ventilação, o que pode corresponder a diferentes consumos e necessidades energéticas [EC, 2003]. Uma boa estratégia de ventilação deve considerar uma grande diversidade de poluentes, e as suas características, fontes, e sua relação com a ocupação, para permitir uma QAI aceitável com o mínimo consumo de energia [Santamouris *et al.*, 1998].

A ventilação pode ser conseguida através de processos naturais, mecânicos ou híbridos. Nos sistemas de ventilação natural, para a renovação do ar do interior do edifício por ar novo atmosférico, recorre-se a aberturas na envolvente com área adequada, autocontroladas ou por regulação manual, e aos mecanismos naturais do vento e das diferenças de temperatura que causam o movimento do ar. Por sua vez, na ventilação mecânica a renovação do ar é realizada pela sua extracção do espaço interior (ar de extracção) e pela insuflação de ar exterior ou de ar tratado, utilizando um sistema de condutas e ventiladores [RSECE, 2006]. Os sistemas de ar condicionado são baseados nos sistemas de ventilação mecânica, capazes de efectuar um controlo de aspectos do ambiente interior, como a temperatura, a humidade, entre outros [CIBSEAM10, 1997]. Os sistemas de ventilação híbridos combinam

sistemas naturais, sempre que as condições permitam caudais suficientes de renovação, e sistemas mecânicos, quando a ventilação natural é insuficiente, de forma alternativa ou complementar [Heiselberg, 1999]. Neste tipo de ventilação é comum ter a admissão de ar exterior por meios naturais estimulada pela extracção mecânica de ar (exaustão) [RSECE, 2006].

As áreas urbanas conferem algumas barreiras à utilização da ventilação natural nos edifícios, como as baixas velocidades do vento, elevadas temperaturas, o ruído e a poluição exterior. A quantificação de algumas destas barreiras, nomeadamente a influência da poluição do ar exterior na QAI, foi realizada pelo projecto URBENT e pelo programa francês PRIMEQUAL [Ghiaus *et al*, 2005]. Esta influência foi estudada através de dados experimentais e modelos numéricos, traduzidos no rácio das concentrações interiores – exteriores, I/O (Indoor/Outdoor). Os poluentes estudados dizem respeito ao ozono, dióxido de azoto e partículas. Os resultados deste projecto revelaram que o rácio das concentrações interiores e exteriores dos poluentes depende da área de abertura no edifício e da concentração de poluentes no exterior. Assim, o rácio I/O é apresentado como uma função da taxa de renovação de ar, ou seja, do transporte de poluentes do exterior para o interior. Também, se constatou que a concentração interior é inferior à exterior e que o rácio I/O aumenta com a ampliação da área de abertura. Por sua vez, o aumento da área de abertura do edifício vai provocar uma maior circulação de ar (ventilação), proporcionando um aumento no transporte de poluentes do exterior para o interior [Ghiaus *et al*, 2005].

A ventilação natural representa um dos sistemas passivos de arrefecimento mais eficientes, contribuindo para a eficiência térmica do edifício. Deste modo é necessário ter em conta a capacidade de arrefecimento, que pode ser influenciável com as condições climáticas, a orografia do local de construção e a permeabilidade do edifício para o fluxo exterior de ar, e o balanço energético do edifício [Cardinale *et al.*, 2002]. Segundo Cardinale *et al.* (2002), a ventilação natural apresenta potencialidades para reduzir o consumo de energia necessário ao arrefecimento do edifício. Este estudo revela ainda que a capacidade de arrefecimento e o consumo de energia dependem da orientação e da exposição do edifício (local, área e geometria da abertura) ao vento e do conforto térmico. Assim, num edifício convencional deve ser garantida a circulação do ar no interior do edifício, a utilização de materiais com uma elevada inércia térmica para reduzir as diferenças de temperatura durante o dia, a limitação dos ganhos térmicos externos pelas paredes, a instalação de uma protecção para controlar a radiação solar e a combinação de outras técnicas passivas de

arrefecimento, tendo em conta a sua interacção com a envolvente. Para o estudo destas variáveis pode-se tornar relevante a utilização de modelos numéricos.

Segundo Budaiwi *et al.* (2001), os modelos numéricos podem ser considerados uma ferramenta importante para a identificação e aplicação bem sucedida de uma estratégia de ventilação, envolvendo as questões da QAI e do consumo energético dos edifícios. Estes modelos complementam os modelos de dinâmica dos fluidos, como os CFD (Computational Fluids Dynamics), os modelos de ventilação e os modelos energéticos [Budaiwi *et al.*, 2001].

Nesta óptica os modelos CFD têm vindo a ser muito utilizados no desenvolvimento e monitorização de estratégias de ventilação natural, para estudo do comportamento do fluxo de ar, de fenómenos de transferência de calor e da qualidade do ar, através da estimativa dos campos exteriores de vento e da concentração de poluentes, em redor dos edifícios [Spengler *et al.*, (2000); Costa *et al.*, (2008)]. Os modelos de ventilação para o cálculo de taxas de ventilação para uma ou várias zonas (multizonas), considerando os seus balanços mássicos e térmicos [Santamouris *et al.*, 1998]. E os modelos energéticos são utilizados principalmente com dois propósitos, para simular, otimizar e projectar um edifício e o seu sistema de AVAC e para estudar o consumo de energia em edifícios existentes [Pan *et al.*, 2007].

Um estudo desenvolvido por Costa *et al.* (2008), no âmbito da modelação de microescala da exposição a poluentes atmosféricos em áreas urbanas, demonstrou que os modelos CFD, utilizados na determinação das condições meteorológicas fronteira (na superfície do edifício), integrados com um modelo simplificado de ventilação natural, permitem o cálculo das taxas de ventilação. Esta integração permitiu obter resultados mais próximos das condições reais.

A integração dos modelos CFD com os energéticos, também pode trazer grandes benefícios, pois através da complementaridade das suas informações, as suposições relativas à dinâmica dos fluxos e às condições meteorológicas, utilizadas individualmente pelos modelos energéticos, podem ser eliminadas e serem utilizados dados mais próximos do real [Chen *et al.*, 2007].

Em Graça *et al.* (2005) é utilizada uma combinação dos dois modelos para a simulação de várias estratégias de ventilação natural no museu infantil de San Diego, EUA, e para o desenvolvimento de um sistema de controlo climático de baixo consumo de energia, através da análise do comportamento térmico do edifício. Esta simulação consistiu no estudo do comportamento térmico dos edifícios (EnergyPlus) e da dinâmica de fluidos

(CFD), através da análise das condições meteorológicas locais, das características construtivas e estruturais do edifício, da geometria e posição das janelas e portas existentes e do controlo da sua abertura. Este estudo revelou que este tipo de simulação traz grandes benefícios no aperfeiçoamento do desempenho de sistemas de ventilação natural. A aplicação de ferramentas numéricas permitiu visualizar que simples estratégias, como a modificação da geometria dos espaços abertos, podem contribuir para a redução do aquecimento no interior do edifício. Outro aspecto da ventilação natural nos edifícios passa pelos seus ocupantes exercerem um controlo na abertura e no fecho das portas e janelas. Consequentemente, a eficiência do sistema de ventilação depende do comportamento, educação e formação dos ocupantes, que têm de ser vistos como os tutores essenciais para o contributo de um melhor desempenho do edifício [Graça *et al.* (2005)].

O desempenho da ventilação natural, em termos da distribuição do ar, migração de poluentes e infiltração, é avaliado pelas taxas de ventilação [Reardon *et al.*, 2002], que são por sua vez influenciadas por factores ambientais, como a velocidade e direcção do vento, diferença de temperaturas entre o exterior e interior e da abertura de ventilação [Baptista *et al.*, 1998].

1.2. Objectivos

O principal objectivo deste trabalho centra-se no estudo do efeito da ventilação natural na qualidade do ar interior e no consumo energético de edifícios localizados em áreas urbanas com reconhecidos problemas de qualidade do ar. Com isto pretende-se caracterizar o transporte de poluentes atmosféricos do exterior para o interior de edifícios e contabilizar a variação dos consumos energéticos associados à utilização de diferentes estratégias de ventilação natural.

Para alcançar os objectivos propostos foi seguida uma metodologia de investigação que complementa a identificação e caracterização dos principais parâmetros que afectam a QAI e o consumo de energia em edifícios com ventilação natural, a compilação e análise crítica da actual legislação europeia e nacional e a revisão da literatura da especialidade sobre as técnicas existentes para a modelação numérica da ventilação natural, da QAI e do consumo energético em edifícios. Para consolidar esta metodologia foi proposta a realização de uma campanha experimental num edifício com ventilação natural e a aplicação de modelos numéricos para a avaliação da ventilação natural, da qualidade do ar interior e do consumo energético dos edifícios. Este trabalho é concluído com a definição de estratégias

para o edifício estudado de modo a assegurar adequados valores de qualidade do ar interior e consumo de energia, em condições de ventilação natural.

2. VENTILAÇÃO NATURAL NOS EDIFÍCIOS

A ventilação natural é o método mais antigo de fornecer ar fresco a um espaço interior, de modo a remover poluentes e odores. Durante alguns séculos, as necessidades de ventilação eram básicas, utilizando aberturas não controladas para o efeito. Este fluxo de ar que permitia a renovação do ar interior, poderia facilmente causar desconforto e correntes de ar ou a entrada de poeiras e chuva [Silva, 2004].

O processo de ventilação natural é explicado pelo movimento de uma massa de ar induzida por uma diferença de pressões e/ou temperaturas. Do mesmo modo que se gera o vento na atmosfera é realizada a ventilação de um determinado espaço interior. Nos edifícios o fluxo de ar é promovido pela diferença de pressão e/ou temperatura entre a zona interior e exterior de qualquer abertura, por exemplo frinchas, portas, janelas, chaminés ou de aberturas específicas para a ventilação. Os processos físicos que permitem gerar essa diferença de pressões são de dois tipos, o térmico, devido à diferença de temperaturas, e o eólico, devido à conversão da energia cinética do vento em pressão estática sobre a envolvente do edifício, Figura 2. No processo térmico a diferença de temperaturas entre o exterior e o interior, ou entre espaços interiores gera diferentes gradientes de pressão, provocando um desequilíbrio de pressões e promovendo a troca de fluxos de ar. No processo eólico a circulação de ar num espaço interior é originada pela acção do vento que depende da sua incidência, da forma do edifício, e das características locais, nomeadamente da proximidade do edifício a obstáculos, orografia e a rugosidade. Esta acção traduz-se sob a forma de pressões distribuídas sobre as envolventes. De uma forma genérica as envolventes de barlavento (lado que sopra o vento) estão sobre a acção de sobrepressões e todas as outras estão sujeitas a sucções, dando origem a fluxos de ar no espaço interior, de barlavento para sotavento (directão para onde sopra o vento) [Silva, 2004]. Estes processos ou a sua acção conjunta podem gerar circulação de ar através de mecanismos de ventilação natural.

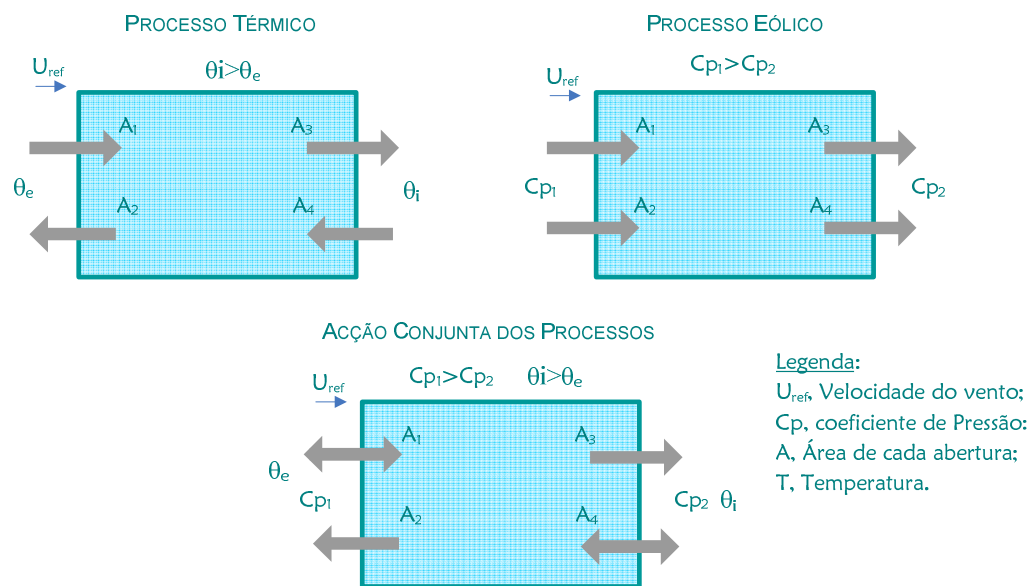


Figura 2. Mecanismos físicos da ventilação natural [Costa *et al*, 2008].

Podem ser considerados dois esquemas globais de ventilação, em fachada única, em que todas as aberturas se encontram na mesma fachada, e cruzada, em que as aberturas se encontram em fachada opostas ou adjacentes [Silva, 2004].

Actualmente, o facto dos requisitos de ventilação serem mais exigentes não invalida que os edifícios sejam naturalmente ventilados. Pois apesar da percentagem de edifícios novos ou renovados com ventilação mecânica ter aumentado, a maioria dos edifícios existentes utiliza a ventilação natural [Santamouris *et al.*, 1998]. A ventilação natural é facilmente integrada no projecto do edifício e apresenta algumas vantagens em relação à ventilação mecânica pelo facto de requerer uma baixa manutenção e limpeza, de ser facilmente adaptável ao conceito do edifício e de não consumir energia [Silva, 2004]. Normalmente, o custo de energia de um edifício que utiliza um sistema de ventilação natural é 40% menor do que um que utiliza um sistema de ar condicionado [Alloca *et al.*, 2002]. Porém, o uso de ventilação natural, principalmente durante a fase de utilização do edifício, revela potenciais limites, como o ruído, a segurança do edifício, a poluição do ar interior, o sombreamento, as correntes de ar e a negligência na sua abertura ou fecho por parte dos ocupantes. Outro aspecto a ser considerado na contabilização no fluxo de ventilação natural são os caudais de infiltração, isto é, fluxos de ventilação não controlados e que seguem percursos através de todo o tipo de aberturas existentes na envolvente do edifício, por exemplo devido à porosidade dos materiais, às juntas de elementos construtivos, às

janelas e portas, aos espaços de instalação de condutas de ar e água e aos circuitos eléctricos [Silva, 2004]. Para contornar estes limites já existem algumas soluções técnicas, como a utilização de protecções para impedir a entrada no edifício de intrusos, pessoas ou animais (grelhas, rede, barreiras), de controlos manuais ou auto – controlos das aberturas para proceder ao seu fecho e/abertura em condições adversas (chuva, calor ou elevadas concentrações de poluentes), de barreiras físicas (janelas, portas) e de aberturas especiais anti – ruído. Geralmente os ocupantes dos edifícios naturalmente ventilados mostram-se satisfeitos com o seu ambiente interior, porque têm algum controlo sobre ele, e devido aos baixos custos que estes envolvem. Existem muitas razões para continuar a considerar a ventilação natural uma opção e uma alternativa viável, pois os designers, administradores e ocupantes devem considerar os limites da ventilação natural como desafios a serem ultrapassados [Santamouris *et al.*, 1998].

2.1. Fundamentos da ventilação natural

2.1.1. Características do vento e o seu efeito nos edifícios

Segundo Santamouris *et al.* (1998), as medições da velocidade do vento junto ao solo demonstram que o vento é um fenómeno altamente variável e irregular, sendo este comportamento designado por turbulência. Nas camadas atmosféricas mais baixas a turbulência é gerada por qualquer obstáculo no solo, como também, por fluxos térmicos instáveis. Devido ao facto do ambiente local ser raramente homogéneo, tem que se proceder à caracterização das suas formas de relevo (montanhas, colinas, vales, etc.), da natureza do terreno (distribuição geográfica das zonas urbanas, campos de cultivo, extensão de áreas de água, etc.) e de obstáculos, como árvores, casas e vegetação.

A presença de um obstáculo, como um edifício, parede ou sebe, geralmente perturba o fluxo de ar do seu lado oposto. Este fenómeno é causado pela formação de uma esteira caracterizada pela diminuição da velocidade e aumento da turbulência. Se for assumido que o vento se movimenta ao longo do eixo das abcissas, então a sua origem é colocada no fim do obstáculo, onde existe a perturbação, Figura 3. A altura acima do solo é representada por z , a altura do obstáculo por H e a velocidade do vento por U [Santamouris *et al.*, 1998].

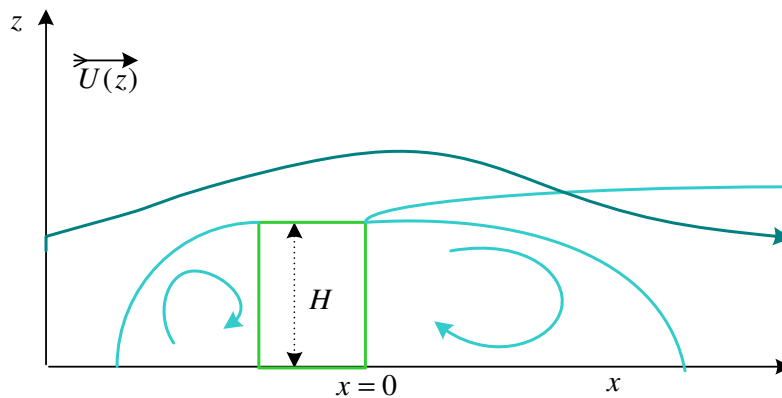


Figura 3. Circulação do vento em torno de um obstáculo isolada [Santamouris *et al.*, 1998].

O fluxo de ar em redor dos edifícios afecta o controlo de factores ambientais e térmicos no seu interior, como a temperatura, humidade, taxas de ventilação e concentração de poluentes. Ao longo do edifício o vento pode causar pressões superficiais que vão variando e alterando as taxas de fluxo de ar dos sistemas de entrada e exaustão, ventilação natural, infiltração e a pressão interior. No entanto, a turbulência do fluxo de ar no exterior do edifício pode causar a recirculação dos gases de exaustão para as entradas de ar [Santamouris *et al.*, 1998].

Num ambiente urbano, a presença de inúmeros obstáculos significa o aumento da rugosidade junto ao solo quando comparado com o ambiente rural. O conceito da variação vertical da velocidade do vento, como função da natureza do terreno, também se aplica ao ambiente urbano, dado que esta vai ser influenciada pela altura dos seus obstáculos em relação ao solo. Assim, quando existe movimentação de ventos fortes de uma zona rural para uma urbana, considerando uma altura de cerca de 20 m acima do solo, verifica-se uma redução da velocidade do vento média de cerca de 20 a 30% e um aumento da turbulência de 50 a 100% [Silva, 2004; Linden, 1999].

2.1.2. Clima interior

Do ponto de vista termodinâmico, um edifício pode ser considerado como um sistema ou uma série de sistemas acoplados. Estes sistemas podem ser compartimentos, paredes, equipamentos, entre outros. O seu equilíbrio termodinâmico pode ser definido por um conjunto de variáveis de estado, nomeadamente a pressão, temperatura, massa ou as concentrações de várias espécies e por uma área geométrica limitada por um invólucro, que pode ser um compartimento ou uma combinação de compartimentos com um

comportamento térmico idêntico. Para o estudo desta zona ou sistema é necessário descrever os fenómenos físicos que decretam o seu desempenho e transcrevê-los em equações, para que sejam tidos em conta os fenómenos que vão influenciar a circulação de ar no edifício e a inércia térmica [Santamouris *et al.*, 1998; Incropera *et al.*, 1990].

A. Transferência de calor num compartimento

Como é demonstrado na Figura 4, o equilíbrio de uma zona e a definição das suas variáveis de estado dependem da interacção das condições meteorológicas e dos factores internos relativos à utilização ou ocupação da referida zona. Nesta Figura, as ligações entre os factores internos ou externos e as variáveis de estado definem o equilíbrio termodinâmico da zona e representam os fenómenos de transferência [Santamouris *et al.*, 1998].

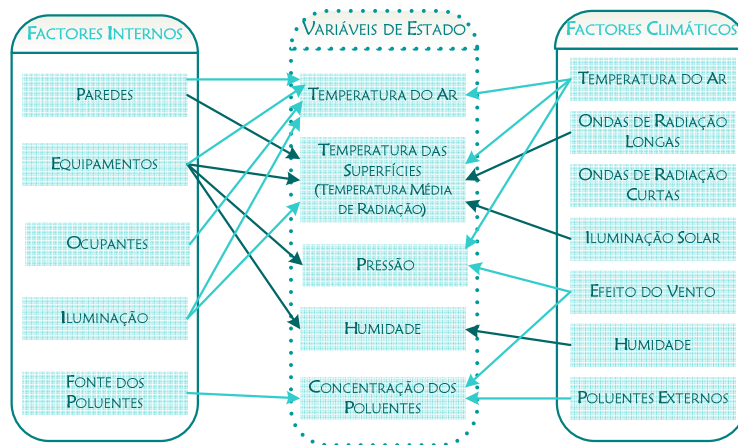


Figura 4. Os fenómenos físicos e as associações num compartimento [Santamouris *et al.*, 1998].

Para a determinação do equilíbrio termodinâmico de uma zona é necessário ter-se em conta dois tipos diferentes de equações físicas. O primeiro diz respeito às equações de transferência que determinam vários fluxos (calor, massa, espécies químicas, entre outros), a partir do conhecimento das variáveis de estado. E o segundo refere-se às equações de conservação que determinam o estado, isto é a pressão, a temperatura ou a concentração de espécies químicas, a partir da quantificação dos vários fluxos intervenientes na zona. Em suma, têm que ser estudados quatro fenómenos físicos, a condução, a convecção, a radiação e a transferência de massa, e integradas três equações de conservação (balanço), nomeadamente de energia, massa e de pressão.

No conjunto de todos estes fenómenos, pode-se visualizar um esquema o equilíbrio térmico de um compartimento, Figura 5, onde,

- E_s representa o poder emissivo da superfície [W.m^{-2}];
- q''_{cs} o fluxo convectivo trocado entre as superfícies internas e o ar [W.m^{-2}];
- q''_{ci} os ganhos convectivos internos (ocupantes+equipamentos) [W.m^{-2}];
- q''_{cond} o fluxo condutivo através das paredes [W.m^{-2}]
- \dot{m} o caudal mássico de ar à temperatura T_e [kg. s^{-1}];
- V o volume do compartimento [m^3];
- T_a a temperatura do ar no compartimento[K];
- T_{si} a temperatura da superfície interior [K].
- T_e a temperatura do ar no exterior do compartimento[K];

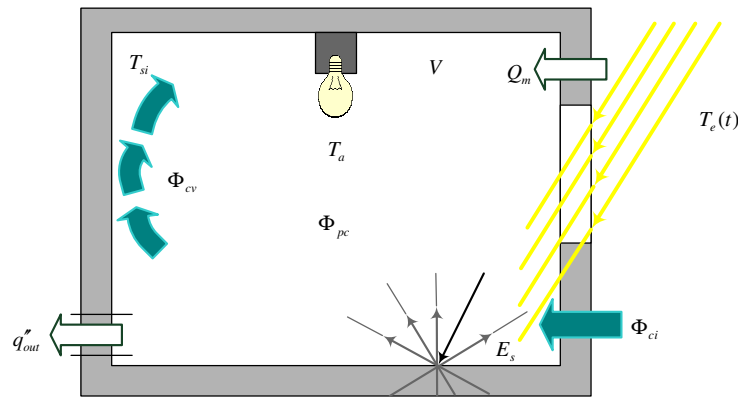


Figura 5. Balanço energético de uma zona ou compartimento [Santamouris *et al.*, 1998].

Assim, o balanço energético global é dado por,

$$V\rho c p \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^N q_i + \sum_{i=1}^{N \text{ superficies}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N \text{ zonas}} \dot{m}_i c p (T_{zi} - T_z) + \dot{m} c p (T_e - T_z) - q_{out} \quad (1)$$

Onde,

$\sum_{i=1}^N q_i$ Representa a taxa de transferência de calor resultante de ganhos convectivos internos (ocupantes+equipamentos) [W];

$\sum_{i=1}^{N \text{ superficies}} h_i A_i (T_{si} - T_z)$ Representa a taxa de transferência de calor do ar por convecção (superfícies da zona) [W];

$\sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i c_p (T_{si} - T_z)$ Representa a taxa de transferência de calor do ar que entra numa determinada zona através da sua ligação com outras zonas [W];

$\dot{m} c_p (T_{\infty} - T_z)$ Representa a taxa de transferência de calor associada ao ar que entra no compartimento proveniente do exterior (aberturas da zona para o exterior) [W];

q_{out} Representa a energia libertada pela zona [W];

$V \rho c_p \frac{dT_z}{dt}$ Representa a energia armazenada na zona [W];

Onde, \dot{m} é o caudal mássico de ar exterior. No caso genérico, este caudal é proveniente do exterior e da ligação com outros compartimentos a temperaturas e pressões diferentes. O fluxo convectivo trocado entre o ar interior e cada superfície do compartimento depende da temperatura de cada superfície interior. Esta temperatura, T_{si} , é definida por o balanço mássico de cada superfície,

Condução = Convecção + Radiação

$$-kn.gradT|_s = h_i (T_{si} - T_z) + E - G \quad (2)$$

Onde,

k é a condutividade térmica da superfície do material [$W.m^{-1}.K^{-1}$];

n a normal externa à superfície S_i ;

A transferência de calor por convecção é descrita como sendo a transferência de energia que ocorre no interior de um fluido devido à combinação dos efeitos de condução e do movimento global do fluido. Independente das características particulares do processo de transferência calor, a equação apropriada para a taxa de transferência tem a forma,

$$q''_{conv} = h_i (T_{si} - T_z) \quad [W.m^{-2}] \quad (3)$$

Onde q''_{conv} , o fluxo de calor convectivo [$W.m^{-2}$], é proporcional à diferença de temperatura entre a superfície i e a zona, T_{si} e T_z , respectivamente. A constante de

proporcionalidade directa, h [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$], é designada por coeficiente de convecção da superfície i e depende das condições da camada limite, as quais por sua vez, são influenciadas pela geometria da superfície, e pelas propriedades termodinâmicas, natureza do movimento e transporte do fluido.

Considerando os processos de transferência por radiação, a radiação que é emitida pela superfície i tem a sua origem na energia térmica da matéria limitada por esta superfície, e a taxa à qual a energia é libertada por unidade de área [W.m^{-2}], é denominada por poder emissivo, E , da superfície i . A radiação também pode ser incidente sobre uma superfície a partir da sua vizinhança, proveniente de uma fonte especial, como o Sol, ou de outra superfície à qual a superfície i esteja exposta. Independente da(s) fonte(s), a taxa à qual todo o tipo de radiação incide sobre uma unidade de área, designa-se por irradiação, G .

Deste modo, pode-se visualizar o balanço demonstrado no esquema da Figura 6.

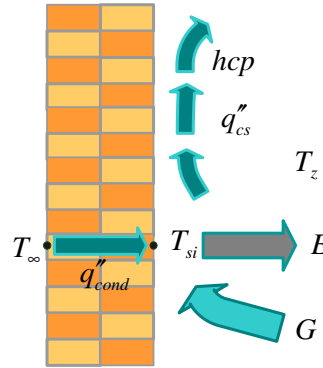


Figura 6. Balanço térmico da superfície de uma determinada zona [Santamouris *et al.*, 1998].

B. Elementos básicos de transferência de calor através de uma parede

Para os processos de transferência de calor é possível a sua quantificação em termos de equações de taxas de transferência de calor apropriadas. Estas equações podem ser utilizadas para a determinação da quantidade de energia transferida por unidade de tempo. Para a condução de calor, a equação da taxa de transferência é conhecida como Lei de Fourier. De acordo com esta equação a condução, pode ser apresentada pela existência de uma relação linear entre o vector de fluxo de calor, q''_{cond} , e o gradiente de temperatura, em qualquer localização de um sólido. Para uma parede plana que apresente uma distribuição de temperatura $T(x)$, a transferência de calor por condução de regiões quentes para regiões frias é dado por,

$$q''_{cond} = -k \text{grad}T = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad [\text{W.m}^{-2}] \quad (4)$$

O fluxo de calor q''_{cond} é a taxa de transferência de calor na direcção x por unidade de área perpendicular à direcção de transferência, sendo proporcional ao gradiente de temperatura, $\partial T/\partial x$. A constante de proporcionalidade k é uma propriedade de transporte designada por condutividade térmica [$W.m^{-1}.K^{-1}$] e é característica da propriedade do material. O sinal negativo deve-se ao facto do calor ser transferido no sentido decrescente da temperatura.

Se se considerar um volume unitário dV , sem uma fonte térmica interna, têm que ser tidos em conta todos os fluxos transferidos para a sua superfície, deste modo pode ser elaborada uma equação de entalpia, definindo este equilíbrio. Esta equação de balanço é normalmente utilizada na forma diferencial e é designada por equação da condução,

$$div(kgradT) = \rho V_{cp} \frac{\partial T}{\partial t} \quad [W.m^{-2}] \quad (5)$$

Se a condutividade térmica, k , for assumida como uma constante, usual em casos da física dos edifícios, então esta equação (16), pode tomar a forma,

$$k\Delta T = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad ou \quad a\Delta T = \frac{\partial T}{\partial t} \quad [W.m^{-2}] \quad (6)$$

Onde a é a difusividade térmica do material [Santamouris *et al.*, 1998].

C. Transferência de massa

No balanço energético de um compartimento, equação 1, \dot{m} é o caudal mássico de ar proveniente do exterior do compartimento. Normalmente, para este caudal contribuem duas fontes, a do exterior, relativo à infiltração ou à renovação de ar (ventilação) e ao ar transferido entre as várias zonas do edifício. Assim, para o estudo de uma zona tem que ser considerada a transferência de massa entre as diversas zonas de um edifício ou entre os espaços interiores e exteriores, que pode ser descrita utilizando a variável de estado, pressão (P), e a equação de conservação da massa entre duas zonas. Do ponto de vista físico, é necessário averiguar o contributo das forças motrizes que influenciam a transferência de fluxo de ar, como o efeito do vento e a flutuação ou efeito de chaminé.

Considerando o efeito do vento, em termos gerais, as equações de Navier-Stokes, para fluxos incompressíveis e não viscosos, integram e reduzem a uma simples expressão combinando o efeito do transporte de ar sobre um campo de velocidade, do gradiente de pressão e da gravidade,

$$\frac{1}{2} \rho v^2 + P + \rho g z = \text{constante} \quad (7)$$

Esta equação, designada por equação de Bernoulli, combina os valores locais de pressão, velocidade e campos de densidade, e é fundamental para a determinação e compreensão do comportamento do fluxo de ar no edifício. Como já foi referido no ponto 2.1.1. o vento gera uma distribuição de pressões em redor do edifício em relação à pressão atmosférica. Esta pressão é determinada corrigindo a pressão dinâmica média do vento através do coeficiente de pressão, δ_p , que depende da forma do edifício, da direcção do vento e da influência da proximidade de outros edifícios e de ambientes naturais.

$$P_s = \delta_p P_v \quad (8)$$

Onde,

$P_v = \frac{1}{2} \rho U_H^2$; U_H a velocidade média do vento a uma altura H do edifício e ρ a massa volúmica do ar exterior em função da pressão atmosférica, temperatura e humidade.

A infiltração de ar, através da flutuação ou do efeito chaminé, surge devido às diferenças de densidade entre o interior e o exterior do edifício ou entre zonas. Nesta aplicação, a massa volúmica do ar é dada como função da temperatura e do grau de mistura do ar. Para a clarificação deste fenómeno é descrito na Figura 7, o efeito chaminé entre duas zonas A e B.

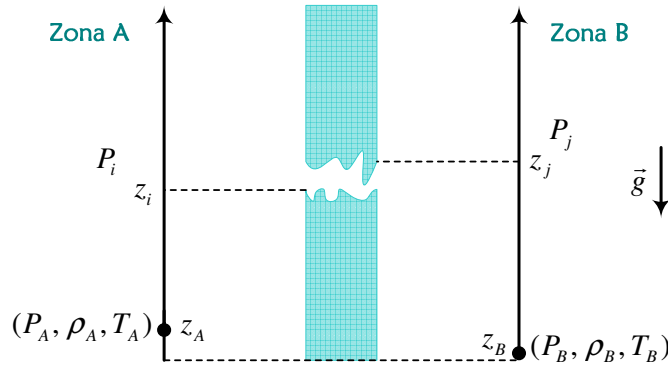


Figura 7. Efeito de chaminé [Santamouris *et al.*, 1998].

Nesta Figura as alturas referência são dadas respectivamente, por z_A e z_B . A pressão referência, a temperatura e a humidade para cada zona são dadas respectivamente, por P_A , T_A e H_A , e P_B , T_B e H_B . As alturas relativas de cada zona são z_i e z_j . A diferença de pressões entre os dois lados da abertura, $P_i - P_j$, em relação à pressão referência em cada zona é,

$$P_i - P_j = P_A - P_B + P_{ch} \quad (9)$$

Onde P_{ch} é a diferença de pressões criada pelo efeito chaminé,

$$P_{ch} = \rho_A g(z_A - z_i) - \rho_B g(z_B - z_j) \quad (10)$$

Nesta equação ρ_A e ρ_B são as massas volúmicas do ar nas zonas A e B, respectivamente. Relativamente às equações de fluxo e usando a equação de Bernoulli, pode ser obtida directamente a expressão teórica para a velocidade de um fluxo de acordo com a diferença de pressões. O caudal mássico teórico obtido por esta diferença de pressões é dado por:

$$\dot{m}_t = \rho A \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (11)$$

Onde A é a área da secção.

Considerando que o fluxo é afectado por características geométricas da abertura, para uma configuração geométrica simples é possível introduzir o coeficiente de descarga, C_d , relativo ao caudal mássico real, \dot{m} , a partir do valor teórico, ou seja,

$$\dot{m} = C_d \rho A \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (12)$$

Por sua vez, para secções ou aberturas com uma geometria complexa, pode ser considerada a função empírica da lei da potência,

$$\dot{m} = K \Delta P^n \quad (13)$$

O expoente n pode tomar valores entre 0,5, para escoamentos turbulentos completamente desenvolvidos e 1, para escoamentos laminares. O coeficiente K inclui as características geométricas da secção e o efeito de descarga, e pode ser interpretado fisicamente como uma caudal induzido por uma diferença de pressões unitária. O valor desta variável é normalmente determinado por medição.

A definição da conservação da massa no interior de cada zona passa pela contabilização de todos os fluxos de ar elementares envolvidos nessa zona,

$$\dot{m}_{vent} + \sum_{k=1}^{N_k} \dot{m}_k = 0 \quad (14)$$

Onde N_k é o total de aberturas na zona considerada, \dot{m}_{vent} o caudal de ar extraído ou fornecido por um sistema mecânico e \dot{m}_k o caudal mássico que passa através de cada abertura k [Santamouris *et al.*, 1998].

2.2. Potencialidades da ventilação natural

A ventilação natural desenvolve um papel fundamental no controlo dos níveis de poluição interior e no conforto térmico dos edifícios através da renovação do ar interior por ar

novo exterior, recorrendo a aberturas na envolvente e aos mecanismos naturais (vento e diferenças de temperatura). Assim, para a implementação de uma estratégia de ventilação natural num edifício têm que ser abordados vários parâmetros, como as fontes, tipo e taxas de emissão dos poluentes, a saúde e o conforto dos ocupantes, o consumo de energia e a conservação dos materiais de construção.

2.2.1. Qualidade do ar interior

A filosofia da ventilação evoluiu de acordo com a mudança dos métodos de construção, materiais, custo de energia e preocupações com a saúde. Actualmente, os edifícios são considerados a nova fonte de contaminação. Assim, as componentes da saúde, economia e estética estão a tornar-se mais importantes que o conforto, no que respeita a esta temática. Na Tabela 1, pode ser observado um esquema com a extensão do conceito original da ventilação apresentado por Fanger em 1996, onde é apresentado a evolução e a relação deste conceito com a QAI, a partir da enumeração de vários paradigmas [Fanger, 1996; John *et al*, 2000].

Tabela 1. Paradigma dado pela filosofia da ventilação e QAI desde 1800 [Fanger, 1996].

Ano	Paradigma	Fontes de Poluição	Factores
2050	Estética Pessoal	Pessoas Edifícios Ambiente Exterior	Os avanços na tecnologia (simulação) colocarão a ventilação mais adaptada aos desejos e necessidades pessoais.
2025			
2000	Saúde, Produtividade e Conforto		Disponibilidade das vacinas e melhoria da percepção das doenças. Os assuntos de saúde não motivaram mais as exigências de ventilação, enquanto que as pessoas permaneceram como fonte primária.
1975	Conforto e Saúde		Alargamento dos conceitos do aquecimento, ventilação e ar condicionado, e realização de trabalhos na temática da ventilação, conforto e produtividade.
1935	Conforto	Pessoas	Prevaleceu a contaminação transportada pelo ar infectado. A tuberculose e as epidemias de gripe forneceram de combustível para o debate das exigências de ventilação mecânica e natural.
1900	Contaminação		Poluição do ar por “vapores envenenados” (expulsão de emanações pútridas foram pelo corpo); “A nossa própria respiração é o nosso maior inimigo”.
1800	Veneno		

A QAI óptima pode ser definida como o ar que se encontra livre de poluentes que causam irritação, desconforto e prejudicam a saúde dos que o inspiram. A quantidade de ventilação necessária para garantir uma QAI adequada e aceitável depende da

concentração e do tipo de fonte poluente dominante num determinado espaço. Pois, se as características de emissão dos poluentes forem conhecidas, é possível determinar a taxa de ventilação necessária para prevenir que a concentração de poluentes exceda a concentração limite predefinida. Esta estratégia pode ser constatada na Figura 8, onde a poluição decresce exponencialmente com a taxa de fluxo de ar. Na prática, a identificação da fonte poluente dominante é muito importante, pois é esta a que requer uma maior taxa de ventilação para o seu controlo e monitorização. Deste modo, se a quantidade de ventilação for suficiente para controlar o poluente dominante, esta também será suficiente para manter os poluentes abaixo das respectivas concentrações limites [Santamouris *et al.*, 1998].

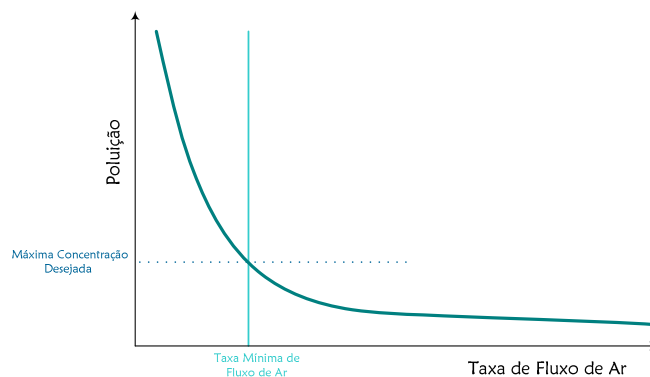


Figura 8. O efeito da ventilação natural na qualidade do ar interior [Santamouris *et al.*, 1998].

A QAI é caracterizada pela concentração dos poluentes do exterior transportados através da taxa de ventilação, pela reactividade dos poluentes interiores e pela percepção do ocupante perante o poluente. Um dos factores construtivos associados a esta relação é a abertura das superfícies do edifício, pois é esta que permite a comunicação entre o interior e o exterior [Ghiaus *et al.*, 2005].

Os poluentes verificados no interior dos edifícios apresentam uma grande variedade de origens, que se podem dividir em fontes internas, que incluem as actividades de manutenção, renovação e remodelação de edifícios, aplicações de calor e os ocupantes e as suas actividades, e externas, como a poluição exterior. Na Tabela 2 são apresentadas sinteticamente as principais fontes dos poluentes, bem como uma breve descrição de algumas das suas características físicas e químicas e efeitos [Hansen *et al.*, 2004; EPA, 2008].

Tabela 2. Fontes e características físico-químicas dos poluentes englobados no índice de qualidade do ar [Hansen *et al.*, 2004; EPA, 2008].

Poluente	Características físico-químicas	Fontes	Efeitos
PM ₁₀ Partículas	Material sólido ou pequenas gotículas de fumo, poeiras e vapor condensado no ar.	Tráfego; Sector industrial; Obras de construção civil; Processos agrícolas; Poeiras	Olhos secos, problemas respiratórios, irritação do nariz e garganta, irritação na pele, tosse e espirros.
CO ₂ Dióxido de Carbono	Incolor.	Respiração e odores corporais; Tráfego; Sector industrial.	Dores de cabeça, cansaço e falta de ar.
CO Monóxido de Carbono	Incolor; Inodoro.	Tráfego; Sector industrial.	Dores de cabeça, náuseas, cansaço e vertigens.
O ₃ Ozono	Incolor; Poderoso oxidante.	Ao nível do solo resulta de reacções químicas entre óxidos de azoto e os compostos orgânicos voláteis na presença de luz solar e de temperaturas elevadas.	Irrita o tracto respiratório, podendo provocar dificuldades respiratórias.
HCOH Formaldeído	Incolor; Odor pungente; Muito solúvel em água; Muito reactivo.	Utilizado na produção de diversos materiais de construção e em numerosos artigos domésticos (produtos químicos); Subproduto da combustão e de outros processos naturais.	Irritação nos olhos, nariz e garganta.
COV's Compostos Orgânicos Voláteis	Solventes de uso comum (benzeno, tolueno, xileno, tricloroetileno, tetracloroetileno, entre outros)	Provenientes da utilização de produtos pessoais (perfume e sprays), produtos de protecção de superfícies (vernizes e tintas), produtos de limpeza, materiais de construção e de mobiliário, e produtos de escritório (colas, marcadores e papel) Tráfego; Sector Industrial.	Odores, sintoma de alergia, vertigens e dores de cabeça.

O paradigma da utilização da ventilação, para garantir uma QAI adequada e minimizar a exposição dos ocupantes a determinados poluentes, surge devido à variedade de fontes e poluentes. Para poluentes provenientes fontes interiores, como o formaldeído e COVs, a sua dispersão é restringida pelo invólucro do edifício e deve ser garantida a troca de ar entre o exterior e interior. Por outro lado, para poluentes essencialmente com fontes exteriores, como os pólenes, a renovação de ar do exterior deve ser reduzida, para minimizar o nível de exposição a este tipo de poluentes. Para poluentes com origem em fontes exteriores e interiores, por exemplo as partículas, óxidos de azoto e monóxido de azoto, a garantia da renovação de ar, vai depender da intensidade dos poluentes entre o exterior e o interior [Li *et al.*, 2003; Hansen *et al.*, 2004; Leslie *et al.*, 1992].

Geralmente, as preocupações associadas aos efeitos da qualidade do ar na saúde pública têm em conta a poluição atmosférica no exterior dos edifícios. Contudo, considerando que

90% do tempo é dispendido em ambientes interiores, nomeadamente em residências, transportes, locais de trabalho e zonas comerciais e de lazer, é relevante ser considerada a influência da poluição interior. Nestes espaços interiores, o desenvolvimento de microorganismos, o uso de produtos de limpeza, a existência de materiais e equipamentos poluentes, a própria ocupação humana e a deficiente ventilação e renovação do ar, são alguns dos contributos para que tanto o número de poluentes como a sua concentração sejam, em geral, muito mais elevados do que no ar exterior. Por estas razões, tem-se verificado uma atenção crescente para os problemas da QAI [APA, 2009].

Em muitos edifícios, a falta de qualidade do ar interior tem tido um impacto crescente na saúde dos seus ocupantes, dando origem a doenças crónicas, como as alergias respiratórias e cutâneas, para além de afectar os padrões de comportamento dos ocupantes com reflexos significativos no bem-estar e na produtividade dos mesmos. O controlo da QAI no interior dos edifícios é sem dúvida, um problema de saúde pública que importa solucionar, em benefício dos seus ocupantes [ADENE].

Embora seja mais eficaz e menos oneroso prevenir os problemas de qualidade do ar interior, como por exemplo utilizando produtos, materiais e equipamentos pouco poluentes, localizando correctamente as entradas de ar nos edifícios, longe de focos de poluição exterior, proibindo de fumar nos espaços interiores, dimensionando correctamente os sistemas de climatização, optimizar as taxas de ventilação, entre outros, do que resolvê-los, em muitas situações estes requerem simples soluções, como as alterações nos hábitos dos ocupantes, substituição de alguns materiais utilizados na decoração ou de produtos utilizados na limpeza, ou um ajustamento das taxas de ventilação dos espaços interiores [APA, 2009; EC, 2003].

2.2.2. Conforto térmico

A sensação térmica está intimamente ligada à percepção do conforto, cujas componentes são altamente subjectivas. O conforto térmico humano é definido pelas condições em que as preferências pessoais não expressem ambientes quentes nem frios. Este é um conceito que surge com alguma complexidade uma vez que depende de vários parâmetros que têm de ter em contas condições colectivas de conforto. Os parâmetros que influenciam o conforto térmico podem ser agrupados em três categorias. A primeira categoria diz respeito aos parâmetros físicos ou ambientais, que incluem a temperatura e as condições térmicas do ambiente (temperaturas médias e de superfície), a humidade relativa do ar, a velocidade do ar no local (média e turbulência), o odor, as cores envolventes, a intensidade luminosa

e o nível de ruído. A temperatura é a principal variável ambiental que influencia a sensação térmica, mas o seu efeito pode ser modificado pela humidade e fluxo de ar. A segunda é relativa aos parâmetros psicológicos, que incluem a idade, sexo e as características específicas de cada ocupante. E a terceira, inclui os parâmetros externos, ou seja, a actividade humana, o vestuário utilizado e as condições sociais. Assim, o conforto térmico humano pode não ser representado simplesmente pelo balanço térmico do corpo humano, pois podem ser considerados alguns parâmetros psicológicos. No entanto, a influência positiva ou negativa destes parâmetros no equilíbrio térmico corporal torna possível a definição de várias estratégias para obter condições de conforto admissíveis. É possível afirmar que o vestuário é o parâmetro individual mais fácil de ajustar ao nível de conforto pretendido. Outro parâmetro que também pode auxiliar no controlo do conforto térmico é a modificação do movimento do ar em redor do corpo humano, pois é este que determina a transferência de calor do corpo humano para a envolvente. No Verão, as altas velocidades atingidas pelo ar aumentam a taxa de evaporação da superfície da pele e, consequentemente aumentam a sensação de arrefecimento [Santamouris *et al.*, 1998; EC, 2003]. O esquema da Figura 9 demonstra o efeito das variáveis ambientais no conforto térmico. O nível de conforto é determinado, pela utilização de múltiplas combinações destas variáveis.

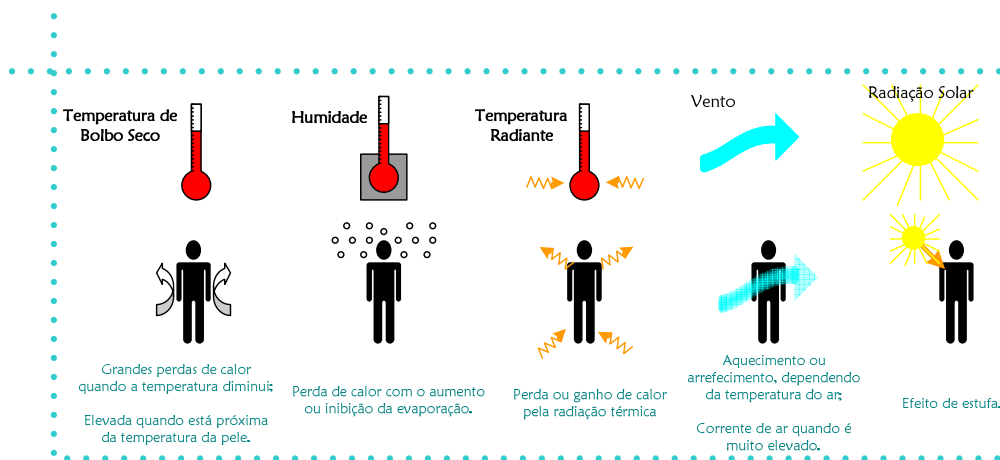


Figura 9. Variáveis ambientais e o seu efeito no conforto térmico [Santamouris *et al.*, 1998].

A avaliação da combinação do efeito da velocidade do ar e as temperaturas de superfície das paredes, permite assumir uma situação de referência de conforto caracterizada por uma temperatura de 25°C, uma humidade de 50%, uma temperatura da superfície das paredes de 25°C e a inexistência da velocidade do ar em torno dos ocupantes [Santamouris *et al.*, 1998].

O conforto térmico nos edifícios é uma condição importante a alcançar para o bem-estar, saúde e produtividade dos seus ocupantes. O desconforto é um indicador importante para a saúde, sendo o primeiro sintoma que alerta os ocupantes para o facto das condições em que se encontram não serem adequadas às suas necessidades, pelo que estes devem actuar, por exemplo fechando ou abrindo uma janela ou porta ou mudarem de local [Tirone, 2009].

O conforto térmico pode ser medido e, como tal, é possível geri-lo ou mesmo exigí-lo. O RCCTE estabelece as exigências de conforto térmico, seja ele para a estação de aquecimento (Inverno) ou de arrefecimento (Verão), e apresenta o conforto térmico como um direito dos ocupantes e estabelece um patamar mínimo que deve ser atingido nos edifícios de habitação e serviços. Este patamar tornou-se mais exigente no âmbito de um pacote legislativo que, abrangendo os edifícios novos e aqueles por reabilitar, introduz também a certificação energética dos edifícios (Tabela 7).

A ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) desenvolveu um sistema para quantificar o conforto onde, tendo em consideração a temperatura (bolbo seco) e a humidade relativa, ficou definido o ‘espaço climático’ no qual 80% das pessoas se sentem confortáveis 100% do tempo. Este método tem sido especialmente útil para projectistas e fornecedores de sistemas de ar condicionado para edifícios e permitiu, durante muitos anos, dimensionar correctamente os sistemas.

No entanto, e com base em inúmeras investigações nesta área, os especialistas chegaram à conclusão que o conforto térmico não é tão linear, uma vez que os mesmos ocupantes se podem sentir confortáveis em condições térmicas diferentes, consoante as características do edifício, por exemplo, num edifício de serviços que depende de sistemas artificiais para criar as condições de conforto (o que, em Portugal, é o caso na grande maioria dos edifícios de serviços, construídos para esse fim, desde os anos 90), a tolerância das pessoas às amplitudes térmicas é muito menor do que se as mesmas pessoas se encontrarem num espaço interior “passivo” que não dependa de sistemas artificiais para alcançar condições de conforto térmico. Estas investigações provaram que a sensação de conforto térmico não é absoluta, mas sim adaptativa, e que essa capacidade de adaptação às condições climáticas do contexto em que se está inserido torna-se mais ampla, mais tolerante, quando o clima em causa resulta de um contexto natural (ao contrário de um artificial). As investigações revelaram ainda outro resultado, que a temperatura e a humidade relativa que originam o estado de conforto em espaços interiores é variável e possui uma forte relação com a temperatura média no exterior [Paul *et al.*, (2007)].

Existem áreas geográficas onde existe possibilidade de garantir conforto térmico de uma forma natural praticamente durante todo o ano. Na grande maioria dos climas da Europa, no entanto, as amplitudes térmicas naturais vão para além dos limites de tolerância do ser humano, resultando na necessidade de se proteger do clima e das suas intempéries para conseguir sobreviver. Portugal tem condições climáticas excepcionais, onde as suas temperaturas médias correspondem exactamente àquelas consideradas confortáveis pelo ser humano, cerca de 18 a 26°C. Mas esta realidade, ou seja o clima ameno que é proporcionado pela natureza e pelo planeta, muitas vezes não é aproveitada nem transformada uma mais valia, porque a qualidade da construção não o permite [Tirone, 2009].

2.2.3. Análise do consumo energética nos edifícios

O consumo energético nos edifícios está geralmente associado à climatização e conforto térmico, aos equipamentos eléctricos e iluminação. No que se refere ao equipamento de ventilação natural não é necessária energia para realizar a movimentação do ar, a única energia que poderá ser requerida é a necessária para o aquecimento do ar renovado num período de aquecimento (Inverno). Muitas vezes, neste mesmo período, são também utilizados sistemas de aquecimento para a climatização do espaço, e o recurso da ventilação natural para a renovação do ar, levanta algumas questões relacionadas com a eficiência energética. Nestas situações, a energia consumida poderá aumentar directamente com a taxa de ventilação, que varia como a função do tempo e depende das características do vento e do estado térmico do edifício. Ao mesmo tempo, o comportamento dos ocupantes, como na abertura e o fecho das janelas e portas, contribui substancialmente para o aumento do consumo global de energia num edifício. Neste contexto pode ser observado, na Figura 10, o efeito da taxa de fluxo de ar no grau de poluição e no consumo de energia. A optimização das taxas de ventilação é crucial para a obtenção de um consumo de energia baixo e uma QAI adequada. [Santamouris *et al.*, 1998].

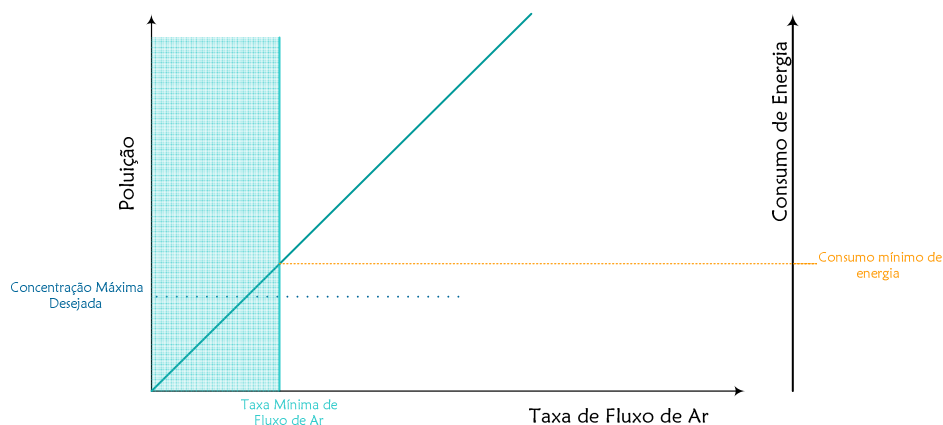


Figura 10. Evolução integrada do grau de poluição e do consumo de energia [Santamouris *et al.*, 1998].

O consumo energético derivado da climatização e conforto térmico dos edifícios está associado aos sistemas de ventilação, aquecimento e arrefecimento, e depende das suas estratégias estruturais e construtivas, como o isolamento, os materiais de construção, as pontes térmicas e número e o tipo de aberturas para o exterior e entre as suas zonas (portas e janelas).

2.3. Análise dos documentos legislativos

Seguidamente são compilados e analisados os principais documentos legislativos, ao nível europeu e nacional, sobre a eficiência energética e a QAI dos edifícios. A legislação compilada permitirá uma análise dos resultados obtidos experimentalmente no decorrer desta trabalho.

A legislação europeia definiu várias directivas que incluem diferentes vertentes da QAI e do desempenho energético dos edifícios, mas não estabelecem nem fixam valores para a QAI, Tabela 3.

Tabela 3. Directivas da EU que incluem aspectos da QAI e do desempenho energético dos edifícios.

Directivas	Designação	Descrição
1989/106/CEE de 21 de Dezembro	Directiva dos Produtos de Construção	Pretende assegurar a livre circulação da generalidade dos produtos de construção na UE, mediante a harmonização das legislações nacionais no domínio dos requisitos essenciais de saúde, segurança e bem-estar aplicáveis a estes produtos.
1990/396/CEE de 29 de Junho	Directiva das Aplicações de Gás	Define requisitos essenciais para o fabrico, funcionamento e instalação de aparelhos a gás.

Tabela 3 (Continuação). Directivas da EU que incluem aspectos da QAI e do desempenho energético dos edifícios.

Directivas	Designação	Descrição
1991/689/CEE de 12 de Dezembro	Directiva das Resíduos Perigosos	Estabelece condições para o manuseamento, recuperação, transporte e eliminação para os resíduos perigosos.
1992/42/CEE de 21 de Maio	Directiva das Aplicações de Calor	Estabelece exigências para o rendimento para as novas caldeiras de água quente alimentadas com combustíveis líquidos ou gasosos.
2001/95/CE de 3 de Dezembro	Directiva da Segurança geral dos Produtos	Garante a segurança dos produtos colocados no mercado.
2002/91/CE de 16 de Dezembro	Directiva do Desempenho Energético dos Edifícios	Estabelece requisitos para a metodologia de cálculo do desempenho energético integrado dos edifícios, a certificação energética dos edifícios e a inspecção regular de caldeiras e instalações de ar condicionado nos edifícios. Define e aplica os requisitos mínimos para o desempenho energético dos novos edifícios e dos grandes edifícios existentes que sejam sujeitos a importantes obras de renovação.
2005/32/CE de 6 de Julho	Directiva do Eco – Design	Define requisitos comunitários de concepção ecológica dos produtos consumidores de energia com o objectivo de garantir a livre circulação destes produtos no mercado interno.
2006/32/CE de 5 de Abril	Directiva da eficiência na utilização final de energia e dos serviços energéticos.	Incrementa a relação custo-eficácia da melhoria da eficiência na utilização final de energia nos Estados-Membros, através do estabelecimento dos objectivos indicativos, bem como dos mecanismos, incentivos e quadros institucionais, financeiros e jurídicos, necessários a fim de eliminar as actuais deficiências e obstáculos do mercado que impedem uma utilização final de energia eficiente e da criação de condições para o desenvolvimento e promoção de um mercado dos serviços energéticos e para o desenvolvimento de outras medidas de melhoria da eficiência energética destinadas aos consumidores finais.

A directiva relativa ao desempenho energético dos edifícios confere aos Estados – membros o estabelecimento e actualização periódica de regulamentos para reduzir os consumos energéticos nos edifícios novos e reabilitados, bem como de medidas para melhorar o seu desempenho energético, tendo em conta as condições meteorológicas externas e locais, o ambiente interior e a rentabilidade económica. Esta directiva, também adopta a obrigatoriedade de uma verificação periódica dos consumos reais nos edifícios de maior dimensão e a disponibilização desta informação ao público que os utilizar, mediante afixação de um certificado apropriado num local visível junto à entrada do edifício.

No decorrer da legislação europeia e como estado membro, Portugal adoptou e estabeleceu regulamentos relativamente à eficiência energética, QAI e conforto térmico, que podem ser consultados na Tabela 4.

Tabela 4. Regulamentos nacionais relativos ao desempenho energético dos edifícios e QAI [ADENE, 2009].

Legislação	Designação	Descrição
DL 78/2006 de 4 de Abril	Sistema Nacional de Certificação energética e da Qualidade de ar Interior (SCE).	O SCE define regras e métodos para verificar a aplicação efectiva do RCCTE e RSECE às novas edificações, bem como, numa fase posterior, aos imóveis já construídos. É uma Legislação relativa à qualidade térmica dos edifícios, com o intuito de proporcionar economias significativas de energia para o país e para os utilizadores dos edifícios.
DL 79/2006 de 4 de Abril	Regulamento dos sistemas Energéticos de Climatização dos Edifícios (RSECE).	Define requisitos para os edifícios de serviços e de habitação dotados sistemas de climatização, ao nível da qualidade da envolvente, da limitação dos consumos energéticos e da eficiência e manutenção dos sistemas de climatização dos edifícios. Neste regulamento, a qualidade do ar interior surge também com requisitos que abrangem as taxas de renovação do ar interior nos espaços e a concentração máxima dos principais poluentes.
DL 80/2006 de 4 de Abril	Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE).	Estabelece requisitos de qualidade para os novos edifícios de habitação e de pequenos serviços sem sistemas de climatização, ao nível das características da envolvente (paredes, envidraçados, pavimentos e coberturas), limitando as perdas térmicas e controlando os ganhos solares excessivos.

Em relação ao RSECE, as exigências em termos dos requisitos da QAI, vão desde a imposição, para edifícios novos, de valores mínimos de renovação de ar por espaço, em função da sua utilização, à limitação de valores máximos de concentração de poluentes, nomeadamente, CO, CO₂, COVs, PM, O₃ e HCOH, até à obrigação de todos sistemas energéticos construídos ou existentes serem mantidos em condições de higiene por forma a garantir a qualidade do ar interior [ADENE, 2009].

Na Tabela 5, podem ser consultadas as concentrações máximas de referência dos poluentes e microorganismos no interior dos edifícios existentes, de acordo com o RSECE [RSECE, 2006].

Tabela 5. Concentrações máximas de referência dos poluentes no interior dos edifícios existentes estabelecidas no RSECE.

Parâmetros	Concentração Máxima de referência	RSECE
Partículas Suspensas no Ar (PM10)	0,15 mg.m ⁻³	Anexo VII
Dióxido de Carbono	1800 mg.m ⁻³	
Monóxido de Carbono	12,5 mg.m ⁻³	
Ozono	0,2 mg.m ⁻³	
Formaldeído	0,1 mg.m ⁻³	
Compostos Orgânicos Voláteis Totais (COV's)	0,6 mg.m ⁻³	
Bactérias	500 UFC.m ⁻³	Artigo 29 °
Fungos	500 UFC.m ⁻³	

*UFC = Unidades Formadoras de Colónias

Os valores dos caudais mínimos de ar novo relativos ao tipo de actividade, regulamentados pelo RSECE, anexo VI, são apresentados na Tabela 6 [RSECE, 2006].

Tabela 6. Caudais mínimos de ar novo estabelecidos no RSECE.

Tipo de Actividade		Caudais Mínimos de Ar Novo	
		[m³.h⁻¹.ocupante⁻¹]	[m³.h⁻¹.m²]
Residencial	Sala de estar e quartos	30	-
	Salas de espera	30	5
Comercial	Lojas de Comércio	-	5
	Áreas de Armazenamentos	-	10
	Vestiários	-	5
	Supermercados	30	-
	Salas de refeições	35	-
Serviços de Refeições	Cafetarias	35	35
	Bares, salas de <i>coktail</i>	35	35
	Sala de preparação de refeições	30	-
	Quartos/ suites	30	-
Empreendimentos Turísticos	Corredores/ átrios	-	5
	Corredores/ átrios	-	5
Entretimento	Auditório	30	-
	Zona de Palco, estúdios	30	-
	Café/ <i>foyer</i>	35	35
	Piscinas	-	10
	Ginásio	35	-
	Gabinetes	35	5
Serviços	Salas de conferências	35	20
	Salas de assembleia	30	20
	Salas de desenho	30	-
	Consultórios médicos	35	-
	Salas de recepção	30	30
	Salas de computador	30	-
	Elevadores	-	15
	Salas de aula	30	-
Escolas	Laboratórios	35	-
	Auditórios	30	-
	Bibliotecas	30	-
	Bares	35	-
	Quartos	45	-
Hospitais	Áreas de recuperação	30	-
	Áreas de terapia	30	-

Para a garantia do conforto térmico e da QAI são estabelecidas no RCCTE as condições de conforto de referência para ambientes interiores, Tabela 7 (Capítulo V, Artigo 14º alínea a).

Tabela 7. Condições de conforto de referência para ambientes interiores estabelecidas no RCCTE.

Estação	Descrição	Temperatura [°C]	Humidade [%]
Aquecimento	Período do ano com início no primeiro decénio posterior a 1 de Outubro em que para localidade, a temperatura média diária é inferior a 15°C e com termo no último decénio anterior a 31 de Maio em que a referida temperatura ainda é inferior a 15°C.	20	-
Arrefecimento	Conjunto dos quatro meses de Verão (Junho, Julho, Agosto e Setembro) em que é maior a probabilidade de ocorrência de temperaturas exteriores elevadas que possam exigir arrefecimento ambiente em edifícios com pequenas cargas internas.	25	50

A Organização Mundial da Saúde (OMS), como entidade de coordenação, monitorização, acompanhamento e avaliação da saúde pública, visa a defesa e a integração da saúde nas políticas e programas energéticos, a nível internacional e nacional. Deste modo, esta avalia o impacto do consumo de energia na saúde e a eficiência das suas intervenções na redução dos encargos de saúde nas crianças, mulheres e noutros grupos vulneráveis. A OMS estabelece orientações para os governos de todo o mundo garantirem a qualidade do ar nas suas cidades e a protecção da saúde humana. De acordo com as suas orientações, tem previsto até ao final de 2009 a publicação de novos valores de referência e objectivos em relação à QAI [OMS, 2009].

2.4. Modelos energéticos

A modelação energética é utilizada principalmente com dois propósitos, para simular, optimizar e projectar um edifício e o seu aquecimento, arrefecimento, ventilação, iluminação e outros fluxos energéticos, e para estudar o consumo de energia em edifícios existentes, a fim de estabelecer bases de referência e de determinar as poupanças energéticas. Para desenvolver a simulação energética de um edifício é necessário realizar a sua caracterização física, nomeadamente a descrição da sua geometria, localização geográfica, características térmicas (como por exemplo, da espessura e material das paredes, número e tipo de aberturas para o exterior e entre as suas zonas), tipo de equipamentos, sistema de AVAC, entre outros. Este tipo de modelação traz mais valias ao nível da simulação e previsão do tipo de utilização e consumo de energia, pois permite a comparação entre vários cenários, conduzindo a projectos energeticamente mais eficientes e económicos [Pan *et al.*, 2007]. De entre os múltiplos benefícios da utilização de ferramentas de simulação energética em projectos destacam-se a maior precisão na previsão

das cargas de climatização, do consumo energético e do comportamento do edifício em situações extremas (ausência ou limitações no sistema de AVAC, carga térmica invulgar), a possibilidade de quantificação dos efeitos em diferentes opções de projecto (free-cooling, sombreamento, isolamento térmico, tipo de vidro, acabamentos interiores, ventilação natural), a determinação de temperaturas de superfícies e a avaliação do conforto térmico. Na Tabela 8 estão representados alguns modelos energéticos, disponíveis no respectivo sítio indicado.

Tabela 8. Modelos de simulação energética.

Programa	Aplicações	Origem
BUS++	Desempenho Energético, Ventilação, Fluxo de Ar, QAI, Ruído [URL 7].	Finlândia
Design Advisor	Simulação do Edifício, Energia, Conforto, Ventilação Natural [URL 8].	EUA
DesignBuilder	Simulação Energética do Edifício, Visualização, Emissões de CO ₂ , Sombreamento, Ventilação Natural, Iluminação, Estudos de Conforto, CFD, Simulação de Sistemas de AVAC, Pré-Projecto, Início do Projecto, Verificação da Conformidade dos Códigos Construtivos do Edifício, Interface OpenGL Energy Plus, Dados Meteorológicos Horários, Aquecimento e Arrefecimento, Tamanho do Equipamento [URL 9].	Reino Unido
EnergyPlus	Simulação Energética, Cálculos de Carga, Desempenho Energético do Edifício, Simulação, Balanço Mássico e Térmico, Ventilação [URL 3].	EUA
NewQUICK	Simulação Passiva, Cálculos de Carga, Ventilação Natural, Arrefecimento, Análise Energética [URL 10].	Europa

Para o desenvolvimento dos objectivos desta dissertação, nomeadamente para a avaliação da ventilação natural, QAI e conforto térmico de um edifício e o estudo comparativo de estratégias de ventilação natural, é proposto a utilização do modelo energético EnergyPlus (E+). O EnergyPlus é um programa de simulação térmica e energética, onde podem ser desenvolvidos estudos para a melhoria da eficiência energética dos edifícios existentes ou em fase de projecto.

O EnergyPlus tem as suas raízes em dois programas, o DOE-2 e o BLAST (Building Loads Analysis), que foram desenvolvidos no final dos anos 70 e inícios dos anos 80 como uma ferramenta de simulação energética e de carga térmica. O público-alvo eram engenheiros e arquitectos que desejavam dimensionar correctamente os equipamentos de ar condicionado de grande dimensão, fazer uma análise do consumo energético e otimizar os mesmos. O desenvolvimento destes programas foi impulsionado principalmente, devido à crise energética do início dos anos 70. Como esses programas o EnergyPlus é um programa que a partir da descrição da construção e de outros parâmetros definidos pelo

usuário determina a carga de aquecimento e arrefecimento necessária para manter o controlo térmico do ambiente, a energia consumida pelos equipamentos responsáveis por esse controlo, e outros parâmetros necessários à análise térmica da construção. Para esses cálculos o EnergyPlus utiliza o conceito de zonas, que podem ser regiões de construção, uma ou um conjunto de salas submetidos ao mesmo controlo térmico. Estas zonas podem interagir termicamente umas com as outras através de superfícies adjacentes e misturas de fluxos de ar [Borduni, 2006]. O EnergyPlus é um programa constituído por duas áreas de simulação, o balanço mássico e térmico e os sistemas do edifício (equipamentos, sistema de AVAC, energias renováveis, etc.), e que desenvolve as suas simulações apartir de uma variedade de dados introduzidos pelo utilizador, referentes à descrição do edifício, e de condições meteorológicas. Nestas simulações podem ser integrados outros programas para uma análise mais detalhada dos componentes do edifício, Figura 11 [URL 3].

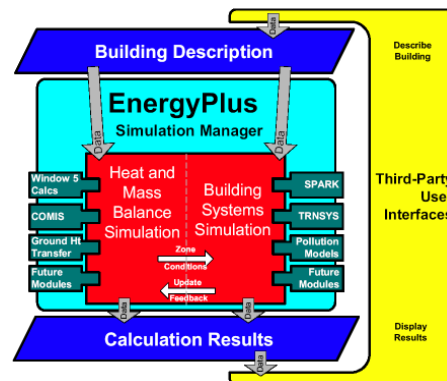


Figura 11. Estrutura do EnergyPlus [URL 3].

A simulação do EnergyPlus é baseada em módulos de cálculo integrados em três unidades de gestão, considerando as superfícies e zonas do edifício e os seus sistemas, integrando os princípios fundamentais do balanço energético, apresentado genericamente no ponto 2.1.2, alínea A e B, descrito por código Fortran 90, Figura 12 [URL 3].

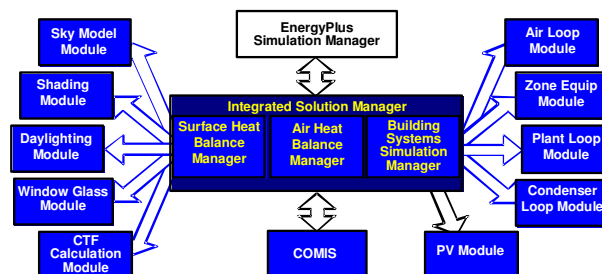


Figura 12. Simulação integrada do EnergyPlus [URL 3].

3. CAMPANHA EXPERIMENTAL

A campanha experimental prende-se com a análise do efeito da ventilação natural na QAI e na eficiência energética numa sala de aula e num gabinete do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro. Para a concretização deste objectivo serão efectuadas a monitorização da QAI e do conforto térmico, a determinação das taxas de ventilação, e a análise energética.

3.1. Monitorização de parâmetros a medir

3.1.1. Taxas de ventilação

O conhecimento dos processos dos fluxos de ar num edifício é muito importante para a avaliação da concepção da ventilação passiva. Infelizmente, estas técnicas de monitorização ainda são muito dispendiosas e complexas na sua aplicação em edifícios com ocupação. Neste ponto serão abordadas três técnicas, Figura 13 [Santamouris *et al.*, 1998].

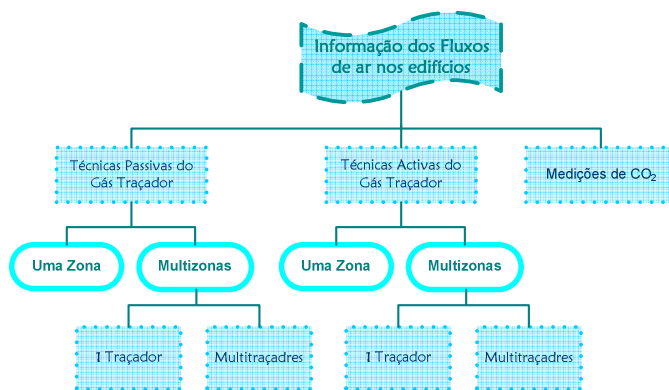


Figura 13. Métodos colectores de informação na ventilação [Santamouris *et al.*, 1998].

Todas as técnicas de medição apresentadas baseiam-se na monitorização da concentração de um gás, designado por gás traçador. De acordo com os objectivos práticos os métodos podem ser divididos em três grupos, nomeadamente as medições activas e passivas de gás traçador e técnica de medição de CO₂. Nas medições passivas de gás traçador o gás traçador é injectado de uma forma passiva, contínua e a uma taxa mais ou menos constante. Só é determinada a concentração média durante o período de medição. As medições activas de gás traçador requerem a injeção do gás traçador. A maior parte das vezes, a concentração de gás traçador é continuamente monitorizada por um analisador de gás, e por vezes também se monitoriza continuamente a taxa de injeção do gás traçador. A técnica de medição de CO₂ é baseada na monitorização das concentrações de CO₂ e considera os ocupantes na zona de amostragem a única fonte de libertação de CO₂.

Um gás traçador ideal não deve ser um constituinte normal do ambiente a ser investigado, tóxico e alérgico, para permitir a sua utilização em espaços com ocupação, nem reactivo e inflamável, e deve ser facilmente mensurável, preferivelmente a concentrações baixas, amigo do ambiente e económico. Nenhum gás traçador satisfaz todos estes requisitos, mas pode ser utilizados vários tipos de gases. Todos os gases utilizados como traçadores, apresentam características dadas pela Tabela 9 [Etheridge et al, 1996].

Tabela 9. Características principais dos gases mais comuns utilizados como gás traçador [Etheridge et al, 1996].

Gás	Massa Molecular	Temperatura de Ebulição [°C]	Densidade (15°) [Kg.m ⁻³]	Método Analógico [ppm]	Gama d Detecção [ppm]	Toxicidade
Dióxido de Carbono (CO ₂)	44	-56,6	1,98	Infravermelho (IR)	0,05-2000	Desprezável
Fréon 12	121	-29,8	5,13	Infravermelho (IR) Cromatografia (GC)	0,05-2000 0,001-0,05	-
Hélio (He)	4	-268,9	0,17	-	-	-
Óxido Nitroso (N ₂ O)	44	-88,5	1,85	Infravermelho (IR)	0,05-2000	-
Hexafluoreto de Enxofre (SF ₆)	146	-50,8	6,18	Infravermelho (IR) Cromatografia (GC)	0,05-2000 0,00002-0,5	-
Perfluoro-n-hexano	338	57,0	-	Cromatografia (GC)	10 ⁻⁶	-

Estes gases são normalmente armazenados em cilindros pressurizados, que podem ser de vários tamanhos dependendo do seu volume, onde os mais utilizados têm 10, 20, 40 e 50 litros.

A. Técnicas activas do gás traçador

A medição da taxa de fluxo de ar no interior e exterior do espaço envolve a libertação e monitorização de gás traçador no interior da zona em estudo.

O balanço de massa do gás traçador é dado por,

$$V \frac{dC}{dt} = Q|C_e - C| + F \quad (15)$$

Onde V [m³] é o volume do compartimento, Q [m³.s⁻¹] o caudal de ar no compartimento, C_e [m³.m⁻³] a concentração de gás traçador no exterior, C [m³.m⁻³] a concentração de gás

traçador no interior e F [$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$] a produção de gás traçador por todas as fontes no compartimento, Figura 14 [Santamouris *et al.*, 1998].

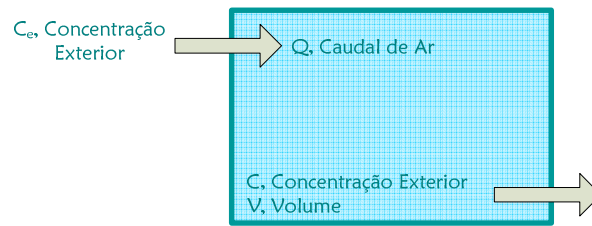


Figura 14. Medição da taxa de ventilação utilizando as técnicas activas do gás traçador [Santamouris *et al.*, 1998].

Os métodos do gás traçador utilizam esta equação para a determinação da taxa de ventilação de acordo com os dados monitorizados. Os diferentes métodos que podem ser utilizados dependem de como o gás traçador é injectado, Tabela 10.

Tabela 10. Métodos activos do gás traçador para a determinação das taxas de ventilação [Santamouris *et al.*, 1998].

Método	Injecção	Resultado	Custo
Taxa de Decaimento	Injecção de uma só vez. A quantidade de gás traçador é desconhecida.	Taxa de Ventilação durante o período de medição (tipicamente durante 30 minutos a 2 horas)	Moderado
Injecção Constante	Injecção contínua a um caudal conhecido.	Taxa de Ventilação Contínua	Moderado
Concentração Constante	Injecção contínua controlada para manter a concentração de gás traçador no espaço.	Taxa de Ventilação Contínua	Relativamente Alto

Método do decaimento

Este método envolve a libertação do gás traçador antes do período de medição e a não injecção de gás traçador ($F=0$) durante esse mesmo período. Quando a taxa de ventilação, Q , é constante durante o período de medição da equação 15, resulta

$$C = C_0 \exp\left(-\frac{Q}{V}t\right) = C_0 \exp(-Nt) \quad (16)$$

Onde, t é o tempo [s], C_0 é a concentração do gás traçador no $t=0$, e o N ($= Q/V$) [s^{-1}] a taxa de renovação de ar. A taxa de renovação (N) pode ser facilmente obtida a partir das concentrações monitorizadas e da equação (16) [Santamouris *et al.*, 1998; Etheridge *et al.*, 1996].

Método da injeção constante

O gás traçador é injectado a uma taxa constante conhecida no espaço de amostragem e as suas concentrações são registadas ao longo do tempo. Este método permite a determinação da taxa de ventilação por cada concentração medida, através da equação (15) [Santamouris *et al.*, 1998; Etheridge *et al.*, 1996].

Método da concentração constante

Este método visa a adaptação da taxa de injeção do gás traçador em relação à sua concentração constante nos espaços de medição. Esta técnica é muito complexa e requer uma medição da taxa de injeção exacta e um algoritmo inteligente para o controlo da taxa de injeção [Santamouris *et al.*, 1998; Etheridge *et al.*, 1996].

B. Técnicas Passivas do Gás Traçador

Os métodos passivos também recorrem à injeção de gás traçador, mas os aspectos hardware são completamente diferentes dos utilizados nos métodos passivos.

Os traçadores de perfluorcarbono (PFT) são libertados a uma taxa constante pela difusão de um composto traçador líquido contido num componente em miniatura. A amostragem de ar também é realizada passivamente pela difusão num adsorvente de carvão activado contido num tubo de vidro estreito. Em princípio, os métodos passivos são apropriados para estudos diagnósticos, fáceis de instalar e apresentam custos razoáveis. A monitorização da campanha inicia-se com a distribuição das fontes passivas de gás pelo edifício, onde serão deixadas por um período de alguns dias ou até alguns meses. As medições são depois colhidas e analisadas por cromatografia de gás num laboratório especializado. Este tipo de medições dá uma estimativa da taxa de ventilação média durante o período de amostragem [Santamouris *et al.*, 1998].

C. Medições de CO₂

Todas as pessoas emitem uma certa quantidade de CO₂ proveniente do seu metabolismo, que apresenta um valor típico de 18 l.h⁻¹. A emissão de CO₂ não é constante, pois depende do tipo de pessoa e do nível da sua actividade. O registo das concentrações de CO₂ pode ser útil nos casos onde o número de ocupantes é conhecido, pois ao conhecer o número de pessoas permite analisar as concentrações da mesma forma que o método da constante injeção. E em períodos sem ocupação, mas seguido de um período com uma ocupação intensiva, as concentrações podem ser analisadas da mesma forma que no método do

decaimento (sem injeção de gás traçador durante o período de monitorização). A vantagem deste método é o facto deste requerer um equipamento simples para a monitorização do CO₂, como um analisador de CO₂. No entanto também apresenta algumas desvantagens, nomeadamente o número de ocupantes tem de ser aproximadamente conhecido e no caso da ventilação durante a noite sem ocupação, a concentração de CO₂ poderá cair muito rapidamente para zero e as medições só são possíveis durante as primeiras horas sem ocupação [Santamouris *et al.*, 1998].

3.1.2. Qualidade do ar interior

Para a avaliação da qualidade do ar interior é necessário proceder à medição de poluentes no interior e exterior do edifício, utilizando os equipamentos de medição adequados para cada caso. Os poluentes seleccionados para este efeito deverão complementar os previstos na legislação, para a avaliação da QAI (RSECE), nomeadamente as partículas suspensas no ar (PM₁₀), dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), ozono (O₃), formaldeído (CHOH) e compostos orgânicos voláteis totais (COV's totais), as bactérias e os fungos.

3.1.3. Conforto térmico

A avaliação da temperatura e humidade relativa em edifícios passivamente ventilados é uma medição essencial para a determinação do seu nível do conforto térmico. Os requisitos dos equipamentos para tais medições incluem a exactidão (na ordem de 1°C), a facilidade de instalação, um custo baixo e a possibilidade de medição durante uma semana com uma frequência de medição no mínimo de uma hora.

A temperatura do ar é talvez o parâmetro mais importante para a definição do conforto térmico de um local, dado que a maioria dos casos a percepção imediata da insatisfação está directamente relacionada com a grandeza em questão. Esta varia com os ciclos de aquecimento e arrefecimento promovidos pelo clima exterior, pelas actividades que se desenrolam dentro do local, pelos equipamentos existentes, pela iluminação e pela regulação dos sistemas de aquecimento e ventilação. Portanto, todos os factores que promovem a variação da temperatura dificultam a medição da mesma.

A humidade relativa é afectada substancialmente pela temperatura do ar e pela ocupação. [Pinho *et al.*, 2005]

A localização destes equipamentos (sensores) deve ser identificada para não perturbar nem obstruir as actividades dos ocupantes, mas ao mesmo tempo deve ser representativa. Isto significa que o sensor não deve estar exposto directamente à radiação solar e que durante a estação de aquecimento, a sua localização não pode ser afectada por equipamentos de aquecimento, ou seja, o sensor não deve estar próximo de um radiador [Santamouris *et al.*, 1998].

3.1.4. Clima externo

A medição das condições meteorológicas, nomeadamente a temperatura, humidade relativa e a velocidade e direcção do vento pode dar uma informação importante em relação à sua influência no clima e QAI. Isto, porque estes parâmetros poderão surgir como renovadores, diluindo e renovando o ar interior, trazendo uma melhoria na QAI, ou como agentes poluidores, ao transportar poluentes do exterior para o interior. Este estudo contribui para a averiguação deste efeito, utilizando a ventilação natural.

3.1.5. Análise energética

A análise energética é essencial no estudo dos consumos energéticos de uma determinada zona e na implementação de estratégias para os reduzir. Num edifício, e segundo o RSECE, esta análise tem em conta vários parâmetros, como as suas características térmicas (envolvente e condições internas), sistema de aquecimento e fornecimento de água quente, instalação de ar condicionado, ventilação mecânica e natural, iluminação, a sua posição e orientação, incluindo as suas condições meteorológicas exteriores, sistemas solares passivos e de protecção solar e as condições climáticas interiores.

3.2. Descrição da campanha experimental

A campanha experimental centra-se na monitorização da QAI e do conforto térmico, com a medição de poluentes, temperatura e humidade relativa nos espaços interiores, sala de aula e gabinete, e no exterior, na determinação das taxas de ventilação adequadas a cada caso de estudo, através do método do gás traçador e medições de CO₂, e na análise energética, pela medição dos consumos energéticos. O período de amostragem é relativo a uma semana, referente aos dias de 3 (Terça-feira) a 9 (Segunda-feira) de Março de 2009.

3.2.1. Caracterização do edifício

O edifício analisado neste caso de estudo diz respeito ao Departamento de Ambiente e Ordenamento (DAO) da Universidade de Aveiro, localizada na cidade de Aveiro, em Portugal, Figura 15.

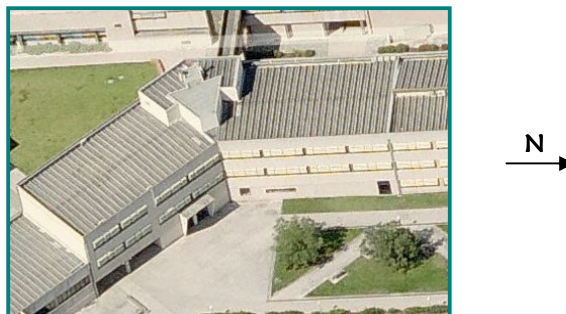


Figura 15. Edifício em estudo (Fonte: URL11).

Este edifício, mais precisamente a sua entrada principal, apresenta uma latitude de 40,6325 N e uma longitude 8,6591 W. Na Tabela 11 podem ser consultadas mais algumas características do edifício em estudo.

Tabela 11. Parâmetros de caracterização do edifício em estudo.

Altitude [m]	12,00
Pisos	4,00
Área total [m ²]	14,94
Área por piso [m ²]	3,74
Volume total [m ³]	179,33
Volume por piso [m ³]	11,21

3.2.2. Caracterização das zonas de amostragem

A campanha experimental é constituída por dois locais de amostragem, no interior e no exterior do edifício, como se pode observar nas Figuras 16 e 17, respectivamente denominadas por A e B. No interior vão ser analisadas duas zonas no primeiro piso do edifício, uma sala de aula (A_1) e um gabinete (A_2). No exterior as medições serão efectuadas com o auxílio de uma unidade móvel de monitorização da qualidade do ar (B).



Figura 16. Esquema da localização dos locais e zonas de amostragem (Fonte: URL 11)



Figura 17. Locais de amostragem.

As zonas de amostragem interiores, Sala de Aula e Gabinete, encontram-se na fachada principal do edifício, orientada a Este, e a sua caracterização é realizada no Anexo I, onde constam vários elementos, como os equipamentos e acessórios, aberturas para o exterior ou interior do edifício, iluminação, sistema de aquecimento e aspectos estruturais e térmicos.

O local de amostragem exterior diz respeito a uma unidade móvel, designada por Laboratório Móvel de Qualidade do Ar, propriedade do Centro de Estudos do Ambiente e do Mar (CESAM). A Tabela 12 e Figura 18 apresentam a caracterização e imagens da torre meteorológica e dos analisadores do Laboratório Móvel de Qualidade do Ar, e também da sua localização.

Tabela 12. Parâmetros de caracterização do Laboratório Móvel de Qualidade do Ar.

Parâmetros	Valores [m]
Altura da torre meteorológica	5,45
Distância da torre meteorológica e do analisador de partículas ao edifício	13,65
Distância dos restantes analisadores ao edifício	14,15



Figura 18. Laboratório móvel de qualidade do ar.

3.2.3. Caracterização dos pontos de amostragem interior

No Interior as medições na sala de aula e no gabinete foram conduzidas num local representativo das actividades ocupacionais, realizadas ao nível das vias respiratórias e a mais de 1 metro das fontes de contaminação (fotocopiadoras, impressoras ou ocupantes). Assim, para esta campanha a escolha da localização dos pontos de amostragem recaiu para um local que não causasse perturbação no normal funcionamento das aulas e a cerca de uma altura de 1.10 m, para a sala de aula e gabinete, devido à maior parte do tempo os ocupantes se encontrarem sentados.

3.3. Metodologia

Neste ponto irá proceder-se à descrição dos procedimentos utilizados para a avaliação da QAI, pela análise da concentração de vários poluentes, e do conforto térmico, pela análise da temperatura e humidade relativa, para a medição e regulação das taxas de ventilação, pela técnica do gás traçador, utilizando o método de decaimento, e pela análise das concentrações de CO₂, e para a análise energética.

3.3.1. Medição e regulação das taxas de ventilação

A determinação das taxas de ventilação realizou-se pelo estudo da evolução da concentração de um gás traçador, neste caso CO_2 , para a sala de aula, e das concentrações de CO_2 , para ambas as zonas. Na técnica do gás traçador foi utilizado o método de decaimento, onde o gás é injectado com uma concentração conhecida num determinado período de tempo. Após esta injeção é realizada a análise da concentração deste gás e da sua dissolução no ambiente envolvente, para se proceder à determinação das taxas de ventilação mais adequadas.

A medição e regulação das taxas de ventilação, vão ser efectuadas através de um estudo da evolução temporal e espacial da concentração de um gás traçador, onde neste caso é o dióxido de carbono, CO_2 , devido ao facto da toxicidade deste gás ser desprezável, pois os espaços interiores utilizados para as medições são constantemente ocupados por alunos, professores e funcionários. Este gás é medido em partes por milhão (ppm), usando método de infravermelhos. A injeção e monitorização do gás traçador complementam a utilização de várias técnicas, neste caso propôs-se a utilização do método de decaimento do gás traçador (Método Activo). Neste método é realizada uma injeção de gás traçador curta e forte no local em estudo, estabelecendo-se uma concentração uniforme. Posteriormente o decaimento da concentração é registado [Santamouris *et al.*, 1998; Etheridge *et al.*, 1996].

O sistema proposto é constituído pelas componentes, Figura 19:

- ❖ **Reservatório de gás traçador:** garrafa de CO_2 ;
- ❖ **Sistema de injeção** que realize o transporte do gás proveniente do reservatório e permita o controlo da quantidade de gás traçador a injectar nos locais desejados. Neste método a quantidade de gás é injectada de uma forma rápida e curta. Este sistema é constituído por uma válvula de redução de pressão no cilindro (sistema regulador da pressão), tubos de material não absorvente e injector que controle a quantidade de gás injectada;
- ❖ **Sistema de mistura artificial**, para se obter uma mistura completa entre o gás traçador e o ar (ventoinha);
- ❖ **Sistema de amostragem**, para retirar amostras de ar e trazer a amostra para o analisador. A escolha de um sistema de amostragem depende do método do gás traçador, do gás traçador seleccionado e do equipamento utilizado;
- ❖ **Analisador de gás**, para a medição de gás traçador no ar. Para este caso pode ser utilizado um analisador de CO_2 ;

- ❖ **Sistema de controlo**, para controlar as medições efectuadas e o funcionamento do sistema [Etheridge *et al.*, 1996].

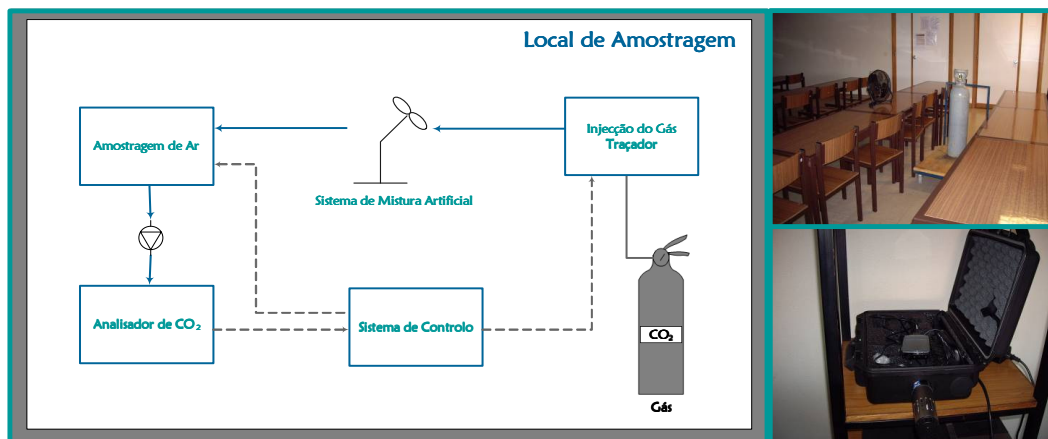


Figura 19. Esquema experimental do sistema do gás traçador.

Em relação à metodologia aplicada para a preparação do teste e medição tem-se:

- ❖ Preparação para o teste: Para a determinação da taxa total de ventilação é necessário conhecer o volume total ventilado (V) e promover uma mistura completa no espaço da medição.
- ❖ Procedimento de medição: O sistema de mistura artificial (ventoinha) é ligado e injecta-se o gás traçador (CO_2) no compartimento. Para facilitar a mistura do gás é proposto a injeção de gás directamente no fluxo de ar criado pelo sistema de mistura. Aproximadamente 10 minutos depois, na maioria dos casos, o gás mistura-se no volume ventilado e inicia-se o registo das concentrações de gás traçador. Para serem obtidas leituras suficientes é conveniente registar as concentrações nos pontos de medição pelo menos em cada 10 minutos. É necessário referir que o tempo total de medição deve ser igual ao tempo nominal (constante), se este poder ser determinado posteriormente, ou pelo menos uma hora [Etheridge *et al.*, 1996].




A medição do CO_2 foi realizada em contínuo e a libertação do gás traçador foi efectuada depois do término das aulas, nos dias 4 e 6 de Março, onde se variou as condições de amostragem.

As condições de referência são dadas pelo RSECE, através dos caudais mínimos de ar novo para os edifícios de serviços, o que diz respeito aos gabinetes, e às escolas, no que se refere às salas de aula, indicados na Tabela 6 do Capítulo 2, alínea 2.4.

3.3.2. Monitorização da QAI

Na avaliação da QAI serão efectuadas medições de poluentes, através de vários equipamentos, e análises microbiológicas. De acordo com os objectivos da campanha experimental vão ser analisados os poluentes abrangidos pela legislação em vigor (RSECE). Para o interior do edifício mediram-se em continuo as concentrações das partículas suspensas no ar (PM_{10}), do dióxido de carbono (CO_2), do monóxido de carbono (CO), do ozono (O_3) e dos compostos orgânicos voláteis totais (COV's totais), e pontualmente, do formaldeído (CHOH), as bactérias e os fungos. E para o exterior do edifício registaram-se em continuo as concentrações das partículas suspensas no ar (PM_{10}), do monóxido de carbono (CO), do ozono (O_3), dos Óxidos de Azoto (NO_x , NO_2 e NO) e dos Benzeno Tolueno Etano e Xileno (BTEX), e pontualmente, as bactérias e os fungos. Neste contexto, foi realizada a caracterização das condições de medição destes poluentes nas zonas interiores consideradas, tendo em conta o número de ocupantes, a contabilização do número de janelas postigos e portas abertas e o tipo de utilização. Na Tabela 13 são apresentados os métodos e equipamentos de monitorização e respectivas características dos poluentes no interior do edifício.

Tabela 13. Métodos e equipamentos de monitorização e respectivas características para a medição dos poluentes considerados nos termos do RSECE.

Parâmetro	Método de Amostragem	Equipamento de Amostragem	Características técnicas	
			Gama	Exactidão
Dióxido de Carbono CO_2	Infravermelho Não Dispersivo (NDIR)	Sonda IQ604 Graywolf		0 – 10000 ppm $\pm 3 \%$
Monóxido de Carbono CO	Método Electroquímico	Sonda IQ604 Graywolf		$\pm 2 \text{ ppm} < 50 \text{ ppm}$ $\pm 3 \% > 50 \text{ ppm}$
Compostos Orgânicos Voláteis Totais COV _{totais}	Detector de Fotoionização (PDI)	Sonda IQ604 Graywolf		20 – 20000 ppb 1ppb
Ozono O_3	Método Electroquímico	Sonda IQ604 Graywolf		-
Partículas Atmosféricas PM_{10}	Método de Separação por Tamanhos (Size Fractionated)	pDR 1200 Thermo		0.001 - 400 mg/m3 $\pm 5 \%$
Formaldeído CHOH	Método de Fotometria Fotoeléctrico	FP 30 RKI Instruments		 0-0.4 ppm (0.005ppm/dígito) 0-1.0 ppm (0.01 ppm/dígito) $\pm 10 \%$

A análise do formaldeído é realizada pontualmente, realizando duas amostragens por dia (1 manhã e 1 tarde).

Análises microbiológicas

Para a realização das análises microbiológicas, foi definida uma metodologia com a colaboração do Departamento de Biologia da Universidade de Aveiro, nomeadamente da Doutora Ana Cristina Sarmento. Esta metodologia é constituída pela monitorização, requisitos do equipamento e nas condições e documentação de colheita, na incubação e na contagem de colónias [Vanhee *et al*, 2008]. As análises microbiológicas foram somente realizadas com o propósito da análise da QAI, pois estas são um requisito da QAI incorporadas na legislação vigente (RSECE).

Monitorização e equipamento de colheita

Para a colheita de microorganismos é proposto um método onde os microorganismos são depositados/ colhidos directamente em meio semi-sólido (placas de agar), Tabela 14, que vai ser utilizado para contagem das colónias de microorganismos e para isolamento e conservação de estirpes. A análise de microorganismos é realizada em laboratório, após período de incubação, por identificação de estirpes com posterior contagem manual de colónias e de unidades formadoras de colónias.

Tabela 14. Método de colheita dos microorganismos e respectivas características.

Método de Colheita	Vantagens	Limitações	Ambientes
Impacto em meio semi-sólido (agar)	<ul style="list-style-type: none"> - Possível identificar as espécies cultiváveis; - Baixo limite de detecção; - Alguns equipamentos permitem a separação de acordo com a granulometria dos bioaerossóis. 	<ul style="list-style-type: none"> - Fraco para estimar efeitos tóxicos ou alérgicos; - Pouco adequado para substituir métodos não baseados na cultura; - Apenas permite colheitas estáticas; - Colheita muito curta; - Perda das partículas maiores; - Agregados são contados como uma única colónia; - Só pode ser utilizado um meio de cultura de cada vez; - Precisão pobre; - Trabalhoso. 	<ul style="list-style-type: none"> - Adequado a ambientes com concentrações relativamente baixas de microorganismos; - Na identificação das fontes é importante conhecer as espécies presentes; - No ar interior identificar.

Nas Tabelas 15 e 16 é apresentada a caracterização da colheita, onde constam o tipo de equipamento, os meios de cultura utilizados e número de amostras.

Tabela 15. Caracterização do equipamento de colheita.

Parâmetro	Equipamento	Caudal de Ar Aspirado [L.min ⁻¹]
Análise Microbiológica (Fungos e Bactérias)	MAS 100 Eco	200



Tabela 16. Caracterização da colheita dos microorganismos.

Microorganismos	Meio de Cultura	Número de Amostras
Bactérias	TSA suplementado com cicloheximida (0,2%)	63
Fungos	Agar de Extracto de Malte (MEA - Malt Extract Agar)	63

Material:

- ❖ Placas de Petri de plástico de 90mm;
- ❖ Meios de cultura:
 - TSA: Tryptic Soy Broth (CASO Broth) 500 g (MERCK), ref.: 1.05459.0500
 - Cicloheximida, ref.: 01810 (FLUKA) 5g
 - Agar de extracto de malte, ref.: 1.05398.0500 Merck 500g

Requisitos do equipamento de colheita

- ❖ Antes de cada colheita o amostrador foi limpo com isopropanol;
- ❖ Foram realizadas 3 réplicas por organismo e por ponto de amostragem (por dia);
- ❖ Realizou-se uma colheita prévia com diferentes volumes de ar 100 e 200L, para escolher o volume a utilizar;
- ❖ O volume de ar e, por conseguinte, o tempo de colheita foi otimizado para ambientes mais, ou menos, contaminados, de modo a obter entre 100 e 200 colónias por placa e a permitir as adequadas contagem e identificação das espécies presentes. A densidade óptima de colónias é de 5 colónias por cm², para as bactérias, e de 2 colónias por cm², para os fungos. Assim, após esta colheita prévia e contagem dos microorganismos seleccionou-se o volume de ar de 200L.



Figura 20. Análises microbiológicas nas respectivas zonas de amostragem.

Condições e documentação de colheita

As colheitas foram efectuadas sempre em triplicado, de modo a minimizar o efeito das flutuações a que os valores estão normalmente sujeitos e o resultado final foi a média de 2 amostras com os valores mais próximos. As placas de cultura e equipamento foram manuseados assepticamente para prevenir a contaminação. As placas foram devidamente identificadas com data da colheita, tipo de organismo, número da réplica e local da colheita, acondicionadas e transportadas, Figura 20.

Incubação

A temperatura de incubação é aquela que é a mais apropriada para a cultura e a que mais se aproxima do habitat no qual os microorganismos se encontravam antes da colheita. Na Tabela 17 é apresentada a temperatura de incubação das bactérias e dos fungos.

Tabela 17. Temperatura de incubação dos microorganismos.

Micoorganismos	Temperatura Incubação [°C]
Bactérias	25
Fungos	

Contagem de colónias

A contagem de colónias foi efectuada após 2, 4 e 7 dias de incubação, Figura 22.



Figura 21. Contagem de colónias após 7 dias de incubação.

Segundo o anexo VII do RSECE (DL 79/2006), podem ser consultadas na Tabela 5 capítulo 2, alínea 2.4, as concentrações máximas de referência de poluentes no interior dos edifícios existentes.

3.3.3. Conforto térmico

Na caracterização do conforto térmico procedeu-se à análise em contínuo de parâmetros, como a temperatura e a humidade, que são variáveis essenciais e que influenciam o estado e comportamento do sistema.

Relativamente aos métodos e equipamentos utilizados na caracterização do fluxo de ar, são apresentados na Tabela 18, os que dizem respeito à medição da temperatura e humidade relativa no interior.

Tabela 18. Métodos e equipamentos de monitorização e respectivas características para a medição da temperatura e humidade.

Parâmetro	Método de Amostragem	Equipamento de Amostragem	Características técnicas	
			Gama	Exactidão
Temperatura	Pt 100	Sonda IQ604 Graywolf	0 – 100 %	± 0.3 °C
Humidade Relativa	Método Capacitivo	Sonda IQ604 Graywolf	-10 a 70 °C	± 2 % < 80 %
				± 3 % > 80 %

Segundo o artigo 14º, alínea a) do RCCTE (DL 780/2006), podem ser consultadas na Tabela 7 capítulo 2, as condições de conforto de referência para a estação de aquecimento e arrefecimento.

3.3.3. Clima externo

No que diz respeito às condições meteorológicas, durante a campanha experimental, foram captados e registados os dados meteorológicos obtidos pela torre meteorológica da Universidade de Aveiro, nomeadamente a velocidade e direcção do vento, temperatura e humidade relativa.

Na Tabela 19 são escritos os tipos de analisadores contínuos utilizados na amostragem exterior.

Tabela 19. Tipo de analisador para cada poluente considerado.

Parâmetros	Analisador
Partículas Suspensas no Ar (PM10)	Environment S.A. PM ₁₀ Analyser 101 M
Monóxido de Carbono (CO)	Environment S.A. CO Analyser 11 M
Ozono (O ₃)	Environment S.A. O ₃ Analyser 41 M
Óxidos de Azoto (NO _x)	Environment S.A. NO _x Analyser AC 31 M
BTX	-

Para a avaliação da influência da qualidade do ar exterior é proposta a medição exterior de vários parâmetros, com o auxílio de uma unidade móvel, Figura 18.

3.3.4. Análise energética

Com a análise energética é pretendido a realização de um estudo dos consumos energéticos envolvidos nas zonas em estudo. Para a concretização desta análise das zonas de amostragem é proposta a realização do estudo e levantamento das características e consumos pontuais, para a determinação da média dos consumos totais envolvidos. Nestas zonas é necessário serem consideradas a energia eléctrica, consumida pelos equipamentos e iluminação, e a energia térmica, proveniente da queima de gás natural numa caldeira para o aquecimento dos espaços, onde o calor é libertado por radiadores.

3.3.5. Síntese dos parâmetros monitorizados

Em síntese, a campanha experimental baseia-se na determinação das taxas de ventilação através de um sistema de medição do gás traçador, que consiste na medição da concentração de CO₂, na caracterização pormenorizada das características da envolvente, na monitorização da QAI, Tabela 20, e na análise energética.

Tabela 20. Monitorização da QAI.

Parâmetros	Elementos	Local de Amostragem
Concentração dos poluentes	CO ₂ , COV's _{totais} , CO, PM ₁₀ , O ₃ , CHOH.	Interior
	BTEX, O ₃ , NO _x , NO ₂ , NO, CO e PM ₁₀ .	Exterior
Análises microbiológicas	Bactérias e Fungos.	Interior e Exterior
Parâmetros de conforto térmico	Temperatura e Humidade Relativa.	Interior e Exterior
Caracterização pormenorizada das características da envolvente	Número, tipo, e estado das aberturas da zona para o exterior e entre zonas, equipamentos, número de ocupantes, tipo de actividade.	Interior
Direcção e velocidade do vento	-	Exterior

3.4. Resultados experimentais

O resultado das medições experimentais resultou numa grande quantidade de dados ou de informação das concentrações de poluentes no interior e exterior, dos parâmetros de conforto térmico, das taxas de ventilação e das condições meteorológicas, que necessita de

ser tratada e analisada. Esta análise complementa a comparação dos valores obtidos no interior (in) com os do exterior (out), para averiguar a influência do ar exterior no interior, e com a concentração máxima de referência (ref) de poluentes no interior dos edifícios, estabelecidas no RSECE e considerando uma ocupação média para a sala de aula e gabinete, 30 e 3 ocupantes, respectivamente.

Os valores do exterior são relativos à torre da Universidade de Aveiro, visto que a torre meteorológica da unidade móvel encontrou falhas na captação dos dados. Também não foram captados os dados relativos à concentração de partículas devido à falha na monitorização do analisador.

No interior do edifício, foi considerado o estudo de duas zonas, uma sala de aula e um gabinete, onde se estipulou um código de cores e formas que caracterizam o tipo de ocupação, as condições de medição e o número de ocupantes, Figura 22.

No Anexo 2, encontram-se as restantes análises gráficas do exterior.

Legenda gabinete:

Tipo de Utilização:	
—	Gabinete Vazio
△	Reunião
*	Limpeza
Condições:	
■	Janelas Fechadas
Ocupantes:	
△	1 a 4 Ocupantes no Gabinete
*	1 a 2 Ocupantes na Limpeza

Legenda sala de aula:

Tipo de Utilização:	
—	Sala Vazia
△	Aula
*	Limpeza
○	Libertação do Gás Traçador
Condições:	
■	Janelas e Postigos Fechados
■	Janelas Fechadas e 1 Postigo Aberto
■	Janelas Fechadas e 2 Postigos Abertos
■	1 Janela Aberta e Postigos Fechados
■	1 Janela Aberta e 1 Postigo Aberto
■	2 Janelas Abertas e 1 Postigo Aberto
Ocupantes:	
△	Número de Ocupantes na Aula
*	1 a 2 Ocupantes na Limpeza

Figura 22. Código de cores e formas para o gabinete e a sala de aula.

3.4.1. Taxas de ventilação

Como já foi referido a taxa de ventilação total foi calculada pelo método do gás traçador, onde se efectuou a libertação do gás (CO_2) nos dias 4 e 6 de Março, na sala de aula, e estimada a partir da sua concentração. A concentração de CO_2 foi medida pelo analisador em contínuo, Figuras 23 e 24.

Em relação às condições de medição, para o dia 4 de Março, a sala estava com as portas e janelas fechadas e os dois postigos abertos e obteve-se a análise gráfica da Figura 23.

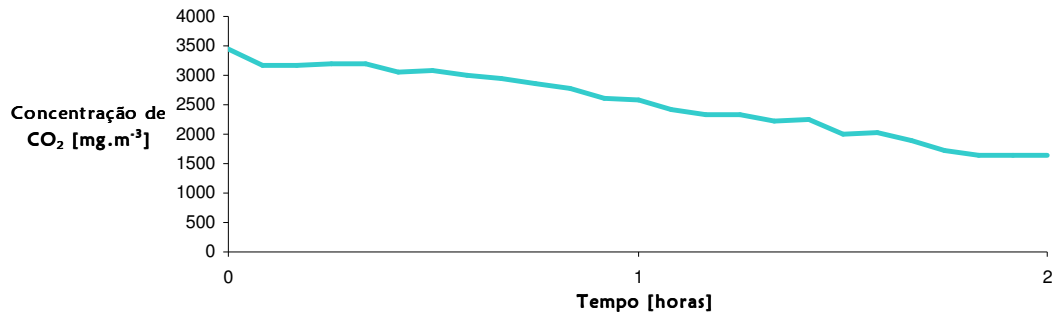


Figura 23. Medição do gás traçador (GT) no dia 4 de Março, na sala de aula.

Utilizando a equação (16), procedeu-se ao cálculo da taxa de ventilação total, ou seja, o volume de ar por unidade de tempo, Tabela 21.

Tabela 21. Cálculo da taxa de ventilação total para o dia 4 de Março.

V [m3]	Δt [h]	C(t ₁) [mg.m ⁻³]	C(t ₂) [mg.m ⁻³]	Q [m ³ .h ⁻¹]
298,52	2,00	3434,91	1641,51	110,21

Aplicando a mesma metodologia para o dia 6 de Março, Figura 24, os resultados são apresentados na Tabela 22. No que diz respeito às condições de medição, a sala estava com as portas e janelas fechadas e um postigo aberto.

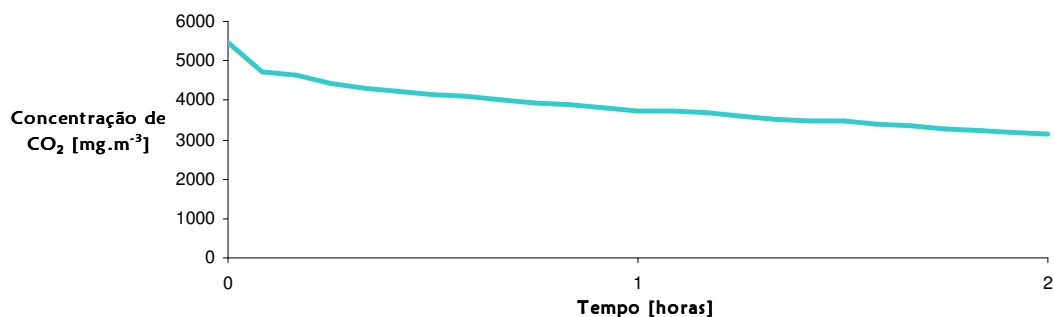


Figura 24. Medição do gás traçador (GT) no dia 6 de Março, na sala de aula.

Tabela 22. Cálculo da taxa de ventilação total para o dia 6 de Março.

V [m3]	Δt [h]	C(t ₁) [mg.m ⁻³]	C(t ₂) [mg.m ⁻³]	Q [m ³ .h ⁻¹]
298,52	2,00	5446,08	3134,79	82,44

De acordo com a legislação, Tabela 6, é definida uma taxa de ventilação mínima para o gabinete de 35 [$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{pessoa}^{-1}$] e para a sala de aula de 30 [$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{pessoa}^{-1}$]. Considerando uma taxa de ocupação média no gabinete de 3 pessoas a taxa de ventilação mínima é de 75 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Para a sala de aula, considerando uma taxa de ocupação de cerca 30 pessoas, a taxa de ventilação mínima correspondente é igual a 900 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

Ao comparar os valores calculados pelo método do gás traçador (GT) e o valor de referência, constata-se uma grande discrepância, o que traduz que a sala de aula não respeita o caudal mínimo de renovação de ar, contribuindo para uma ventilação insuficiente. As taxas de ventilação foram igualmente determinadas através das concentrações de CO_2 medidas em contínuo na sala de aula e no gabinete, após a saída dos ocupantes, e da equação 21. Na Figura 25, pode ser analisada essa determinação e, para a sala de aula, a sua comparação com as taxas de ventilação obtidas através do método do gás traçador.

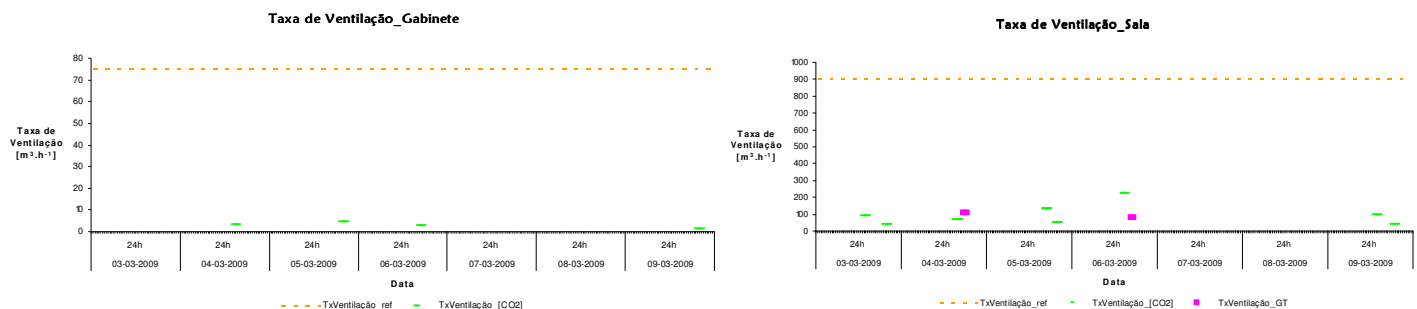


Figura 25. Determinação das taxas de ventilação pelas concentrações de CO_2 em comparação com as taxas obtidas com o método do gás traçador (sala de aula).

Por este método a taxa de ventilação no gabinete e na sala de aula apresentam valores inferiores aos mínimos recomendados, o que também sucedeu com o método do gás traçador. Comparando os valores calculados pelos dois métodos, pode-se verificar que estes apresentam a mesma ordem de grandeza.

3.4.2. Avaliação da QAI

A. Gabinete

Os valores das concentrações de COV's totais, Figura 26, encontram-se cerca de 90% acima do valor máximo de referência (0,6 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$), para a semana normal de utilização, verificando-se uma descida durante o fim-de-semana. A origem destes valores pode derivar do facto deste poluente ter uma origem essencialmente interior, utilização de produtos pessoais, produtos de acabamento, materiais de escritório, entre outros. Para efeitos de

comparação da concentração exterior com a do interior, vai ser utilizado o BTEX no exterior e COV's totais no interior.

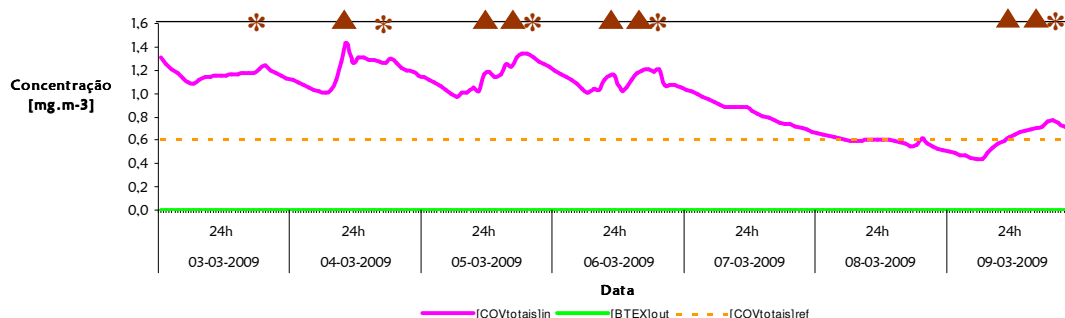


Figura 26. Evolução da concentração dos COV's totais no gabinete, em comparação com a concentração de referência e de BETX no exterior.

Os picos das concentrações de CO₂ referem-se ao período de utilização, que neste caso são reuniões, atingindo um máximo próximo de 4000 mg.m⁻³, e uma concentração acima do máximo de referência (1800 mg.m⁻³), Figura 27.

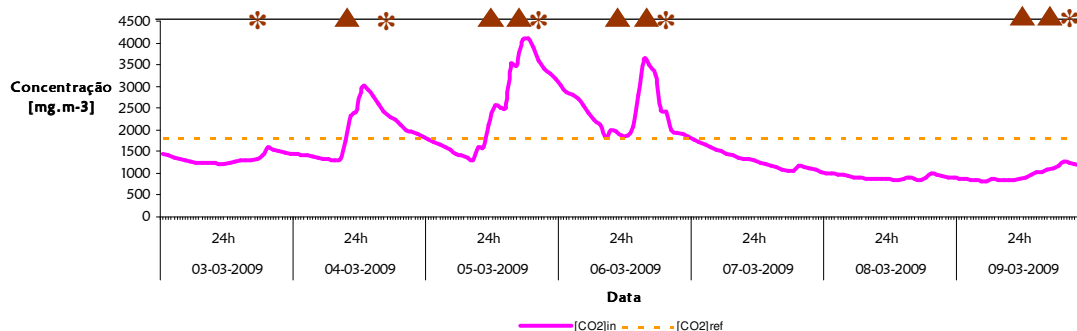


Figura 27. Evolução da concentração de CO₂ no gabinete, em comparação com a concentração de referência.

No que diz respeito às concentrações de O₃ e CO no interior, Figura 28 e 29, pode-se constatar que estas são inferiores à concentração máxima de referência, cumprindo o nível de conformidade do regulamento vigente. A concentração de referência para o O₃ é de 0,2 mg.m⁻³ e para o CO é de 12,5 mg.m⁻³. Pode-se também verificar, na Figura 28, que os valores mais elevados da concentração de O₃ dizem respeito ao período de ocupação do gabinete.

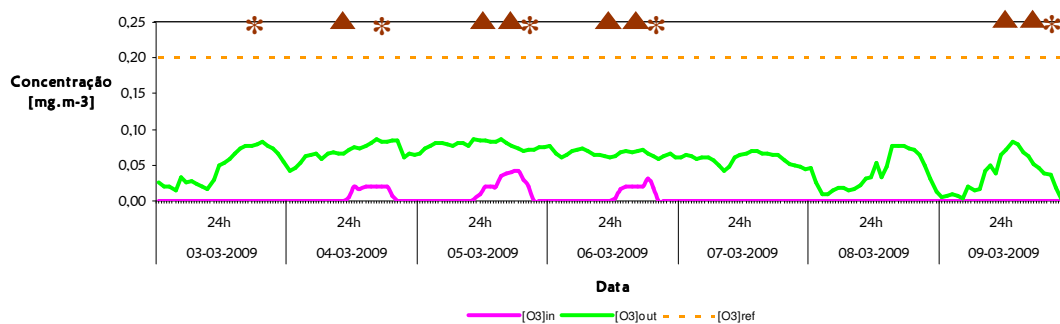


Figura 28. Evolução da concentração de O_3 no gabinete, em comparação com a concentração de referência e no exterior.

Pela análise da Figura 29, pode-se verificar que as concentrações de CO, ao longo da campanha experimental, encontram-se abaixo da linha de referência e que a sua variação não é muito significativa.

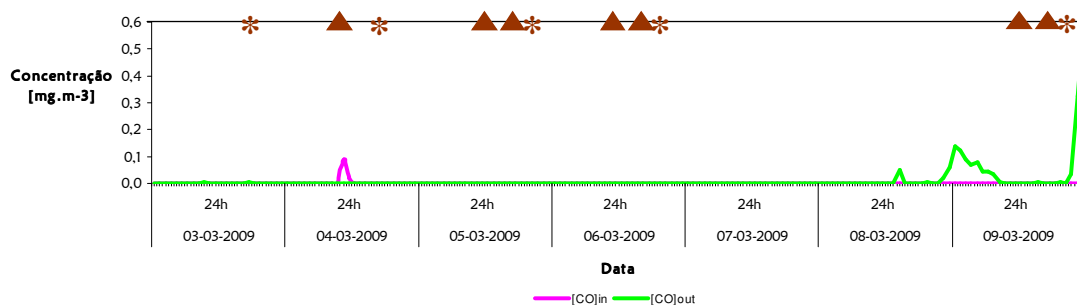


Figura 29. Evolução da concentração de CO no gabinete, em comparação com a concentração no exterior.

Para o gabinete foram detectados valores para a concentração de formaldeído, que se encontram próximos da concentração de referência ($0,1\text{mg.m}^{-3}$), Figura 30.

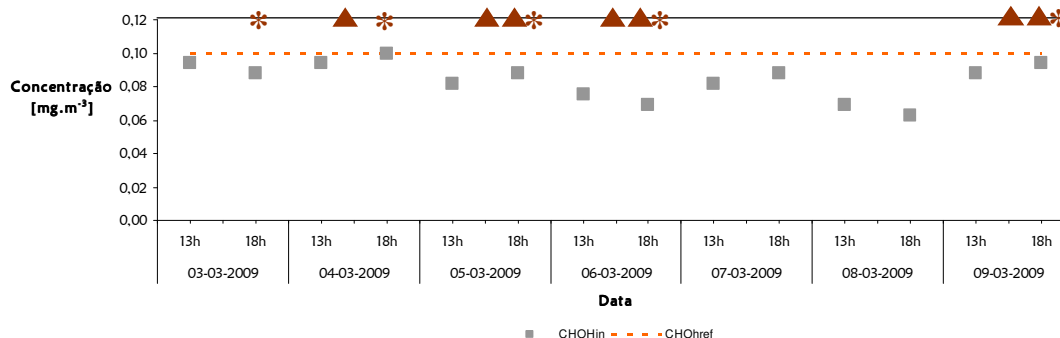


Figura 30. Evolução da concentração de HCHO no gabinete, em comparação com a concentração de referência e no exterior.

Em relação às análises microbiológicas, bactérias e fungos, Figura 31 e 32, é de referir que a maior quantidade de unidades formadoras de colónias é de bactérias, bem como a sua proximidade da concentração de referência (500 UFC. m^{-3}), principalmente nos dias de maior utilização deste espaço interior.

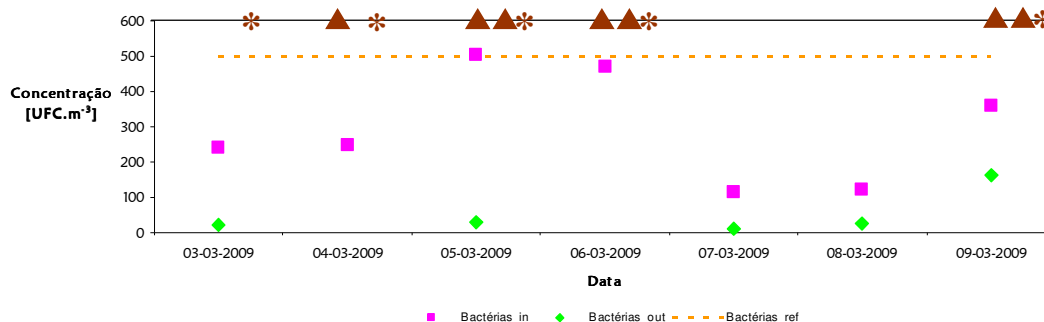


Figura 31. Evolução da concentração de bactérias no gabinete, em comparação com a concentração de referência e no exterior.

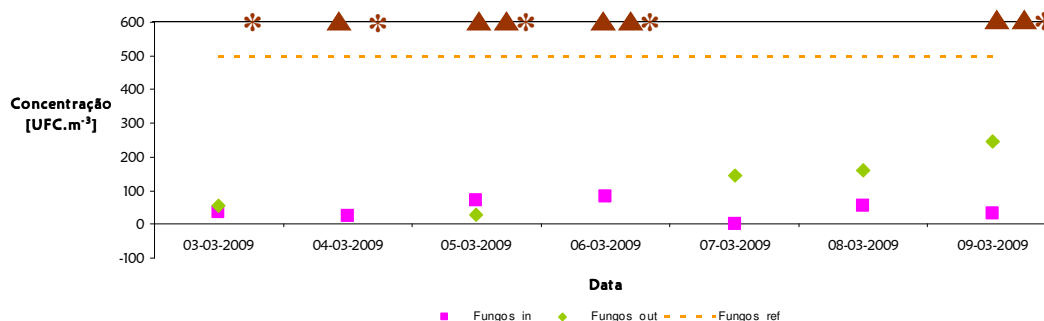


Figura 32. Evolução da concentração de fungos no gabinete, em comparação com a concentração de referência e no exterior.

B. Sala de aula

Em relação às concentrações de COV's totais, foi detectado um erro de medição no primeiro dia da campanha, o que afectou as medições posteriores.

Relativamente à análise do CO₂, Figura 33, pode-se constatar que os seus picos coincidem com o período de aulas, em que a concentração máxima de referência (1800 mg.m^{-3}) é sempre ultrapassada atingindo um valor máximo de $5502,20 \text{ mg.m}^{-3}$.

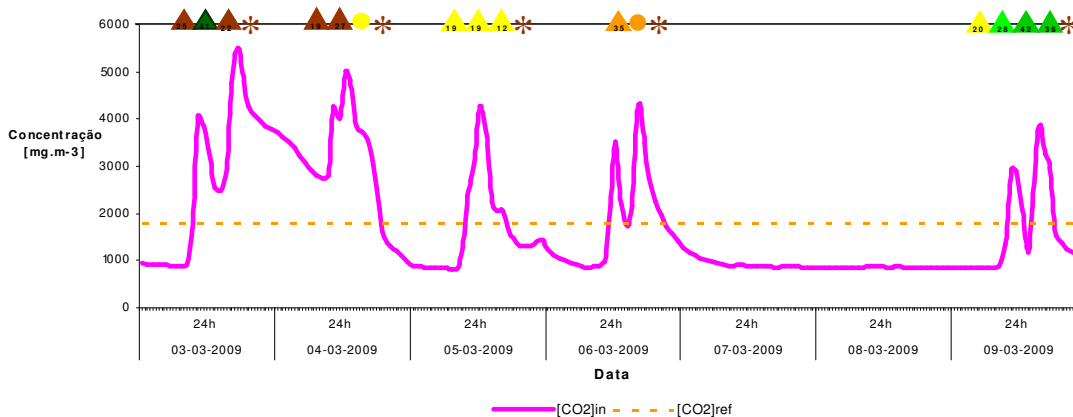


Figura 33. Evolução da concentração de CO₂ na sala de aula, em comparação com a concentração de referência.

De acordo com esta análise pode-se concluir que a concentração de CO₂ depende do número de ocupantes, que emite uma determinada quantidade desse CO₂, e do número de janelas e postigos abertos, que vai determinar a quantidade de ar que circula do exterior para o interior e vice-versa. Para uma análise mais detalhada da variação da concentração de CO₂ com o número de ocupantes e condições de medição na sala de aula, foi determinada a concentração efectiva de CO₂ para cada aula no período de amostragem, Figura 34. Desta análise conclui-se que a abertura de janelas e postigos vão influenciar a concentração de CO₂, na medida em que o facto de aumentar a quantidade de entrada de ar, vai fazer com que haja diluição deste poluente no interior da sala. Como suporte desta conclusão tem-se o exemplo do dia 3 de Março, em que a concentração efectiva de CO₂ é mais elevada quando as janelas e postigos estão fechados, A, do que quando está uma janela aberta, B. Outro exemplo, pode ser verificado no dia 9 de Março, onde a concentração de CO₂ é mais elevada quando as janelas estão fechadas e os dois postigos estão abertos, C, depois diminui quando se abre uma janela e se fecha um postigo, E, e é menor, quando duas janelas e um postigo estão abertos, D.

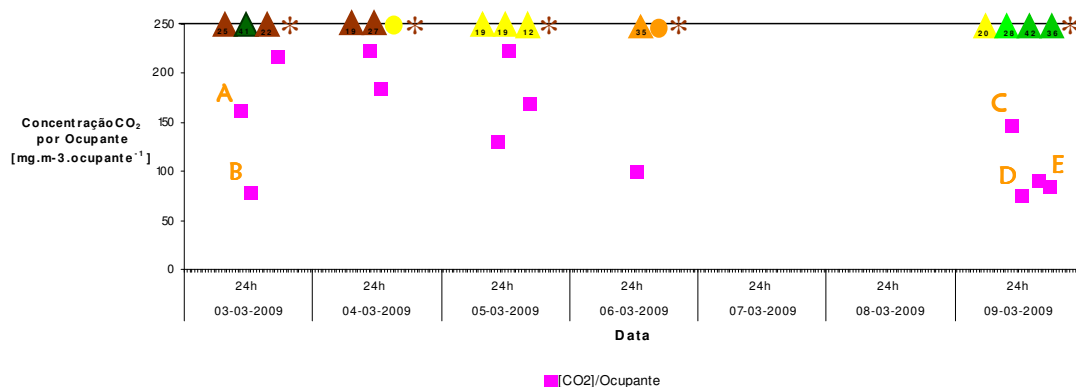


Figura 34. Concentrações efectivas de CO₂ na sala de aula.

No que se refere às concentrações de O₃ e CO no interior, Figura 35 e 36, pode-se concluir que estas estão abaixo da concentração máxima de referência, cumprindo o nível de conformidade do regulamento vigente.

No que diz respeito à evolução da concentração de O₃, Figura 35, pode-se verificar uma dependência com a abertura de janelas e postigos, o que pode tornar relevante a influência do exterior. Isto pode ser constatado pelos valores nulos quando estão as janelas e postigos fechados, dias 3 e 4 de Março, e o aumento da concentração quando se abrem os dois postigos, dia 5 de Março. No fim-de-semana, dias 7 e 8 de Março, apesar de não haver aulas, foram mantidos os dois postigos abertos, por isso os valores de O₃ demonstrarem o comportamento observado.

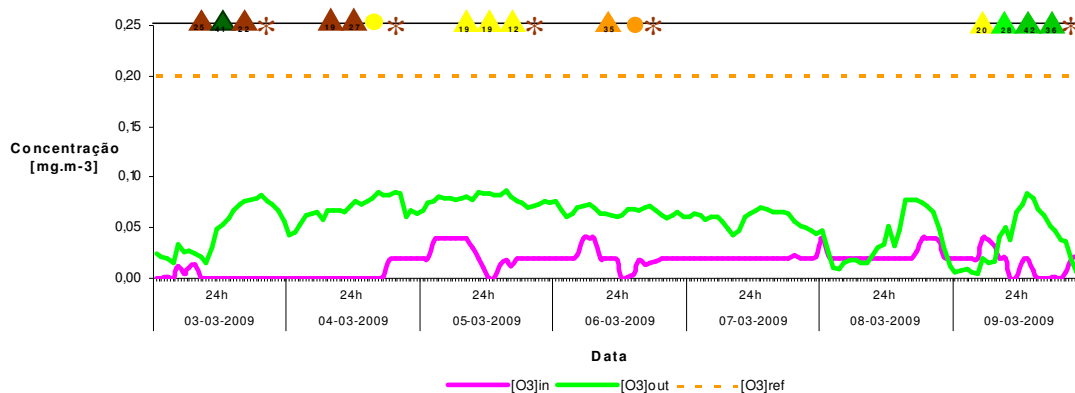


Figura 35. Evolução da concentração de O₃ na sala de aula, em comparação com a concentração de referência e no exterior.

Como o gabinete, as concentrações de CO na sala de aula são maioritariamente nulos, Figura 36, o que revela que este poluente quase não foi detectado e que as suas fontes são pouco significantes.

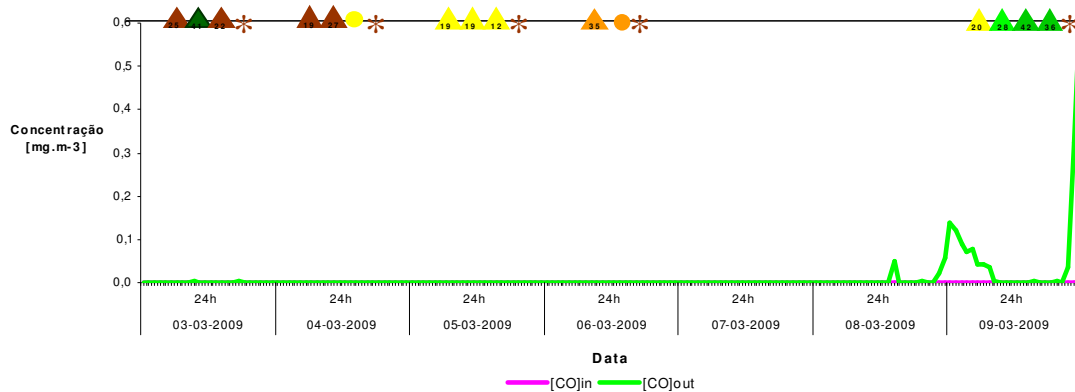


Figura 36. Evolução da concentração de CO na sala de aula, em comparação com a concentração no exterior.

Para o formaldeído o equipamento não detectou nenhuma medição, devido à sua concentração ser inferior à capacidade de detecção do equipamento de medição, ou seja a $0,0125 \text{ mg. m}^{-3}$.

Em relação às análises microbiológicas, bactérias e fungos, Figura 37 e 38, é de referir a maior quantidade de unidades formadoras de colónias de bactérias do que fungos, bem como a sua proximidade da concentração de referência (500 UFC.m^{-3}), nos dias de ocupação da sala. Também se pode constatar que nos dias com uma maior velocidade do vento, ou seja, 4, 5 e 6 de Março, a concentração de bactérias e fungos, no exterior, é muito menor.

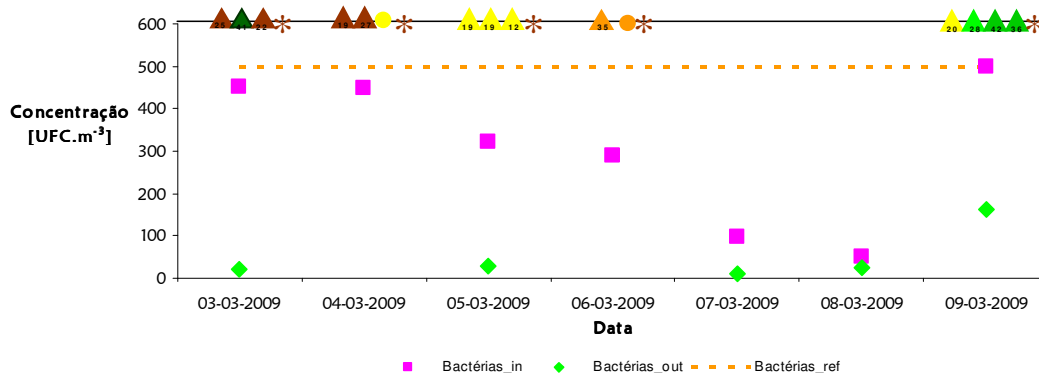


Figura 37. Evolução da concentração de bactérias na sala de aula, em comparação com a concentração de referência e no exterior.

No que diz respeito aos fungos, Figura 38, pode-se verificar uma aproximação com o exterior, que pode significar uma influência das unidades formadoras de colónias de fungos do exterior no interior do edifício.

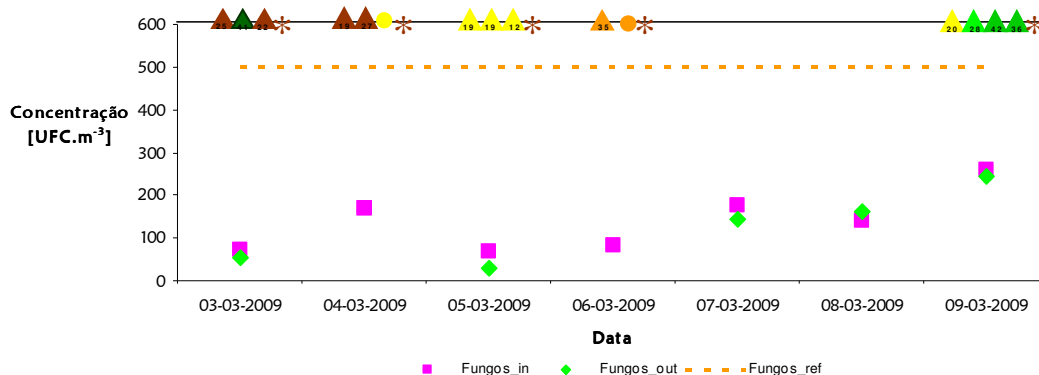


Figura 38. Evolução da concentração de fungos na sala de aula, em comparação com a concentração de referência e no exterior.

Em relação às partículas não se verificou a captação dos dados nas duas zonas, devido à falha na manipulação do equipamento. A restante análise gráfica para os poluentes medidos no exterior, como os óxidos de azoto e partículas, encontra-se no Anexo 2.

3.4.3. Conforto térmico

A. Gabinete

Para os parâmetros de conforto térmico no gabinete, temperatura e humidade, Figuras 39 e 40, constata-se na Figura 39 a dependência da temperatura com a ocupação da sala de aula, pois são constatados picos de temperatura quando o gabinete é utilizado. Neste período de utilização, as temperaturas do interior são superiores às condições ambientes de conforto de referência, que indicam uma temperatura de 20°C. Comparando as temperaturas interiores com as do exterior, como era de esperar as do interior são mais elevadas apresentando uma diferença de cerca de 10°C.

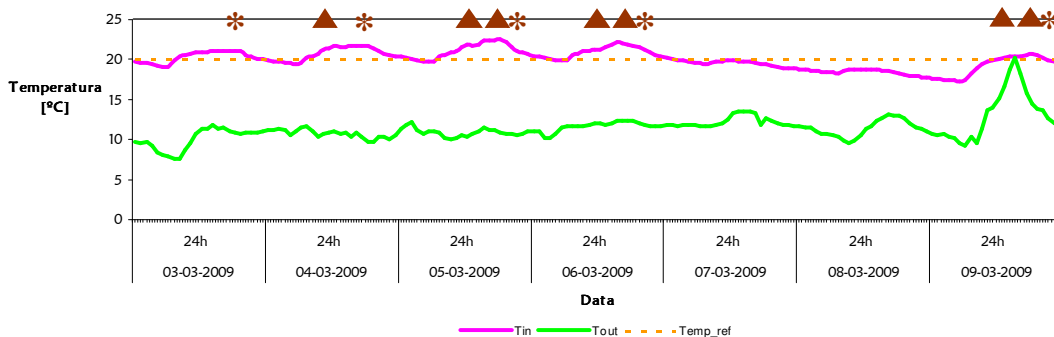


Figura 39. Evolução da temperatura no gabinete em comparação com a temperatura referência e no exterior.

Na Figura 40, constata-se que os valores exteriores de humidade são superiores aos do interior. Apesar de não estar implícito na legislação o valor da humidade relativa para a estação de aquecimento considerou-se de acordo com a revisão da literatura um valor de referência de 50% [Santamouris *et al.*, 1998]. Deste modo, pode-se verificar que a humidade apresenta valores muito próximos dos da referência.

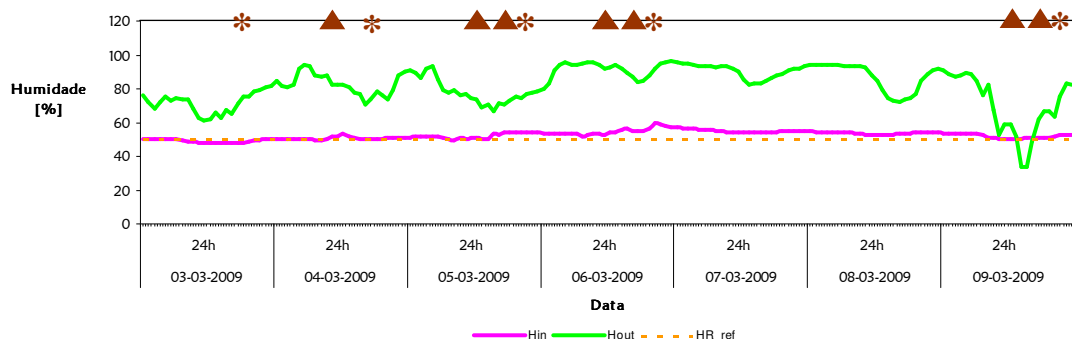


Figura 40. Evolução da humidade no gabinete em comparação com a humidade referência e no exterior.

B. Sala de aula

Para a sala de aula, Figuras 41 e 42, pode-se verificar a dependência da temperatura e humidade interior com a ocupação da sala de aula, pois são constatados picos de temperatura no período de aulas. Na Figura 41 também se pode constatar a superioridade de cerca 10°C da temperatura interior em relação à temperatura exterior e que os picos de temperatura, relativos ao período de utilização ou de aulas, ultrapassam os valores referência da temperatura das condições ambientes de conforto (20°C).

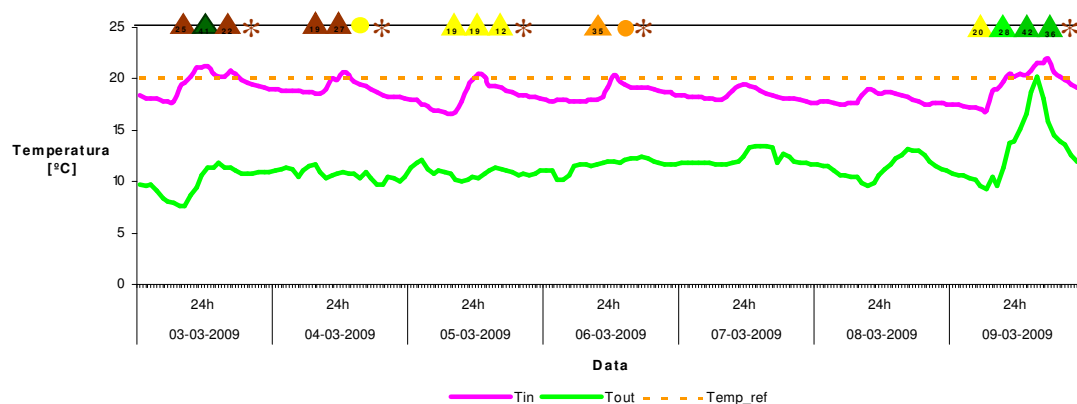


Figura 41. Evolução da temperatura na sala de aula em comparação com a temperatura referência e no exterior.

Para a humidade tal já não se verifica, Figura 42, pois a humidade no exterior é superior à no interior. Considerando a humidade relativa de referência 50%, verifica-se que a maior parte dos valores obtidos experimentalmente encontra-se acima desse valor.

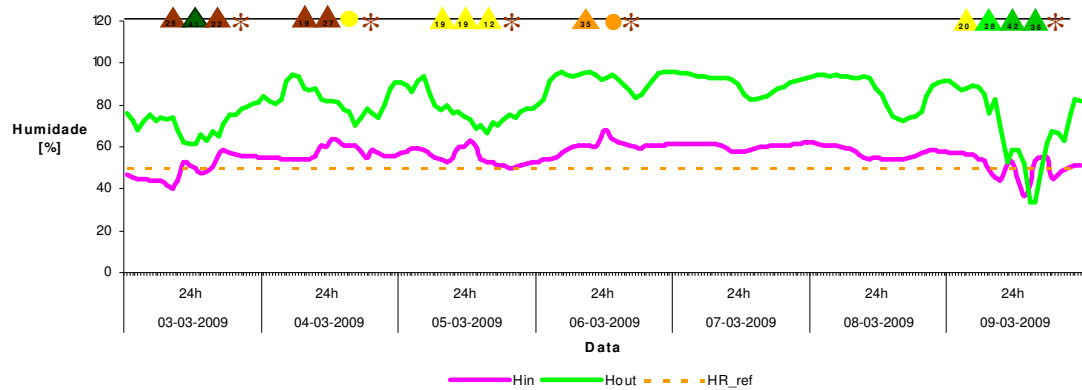


Figura 42. Evolução da humidade na sala de aula em comparação com a humidade referência e no exterior.

3.4.4. Síntese dos resultados

De acordo com os dados obtidos para a campanha experimental foi realizada a Tabela 23, com avaliação do cumprimento (✓) ou não cumprimento (✗) da legislação em vigor dos parâmetros da QAI e do conforto térmico.

Tabela 23. Síntese dos resultados experimentais obtidos para a QAI e para o Conforto Térmico.

		Valor máximo de referência	Gabinete	Sala de Aula
QAI	Partículas (PM10)	0,5 mg.m ⁻³	-	-
	Dióxido de carbono	1800 mg.m ⁻³	✗	✗
	Monóxido de carbono	12,5 mg.m ⁻³	✓	✓
	Ozono	0,2 mg.m ⁻³	✓	✓
	Formaldeído	0,1 mg.m ⁻³	✓	-
	Compostos Orgânicos Voláteis	0,6 mg.m ⁻³	✗	-
	Bactérias	500 UFC.m ⁻³	✓	✓
	Fungos	500 UFC.m ⁻³	✓	✓
Conforto Térmico	Temperatura	20°C	✗	✓
	Humidade	50%	✓*	✗

* Valores muito próximos dos valores de referência.

Para o espaço interior ter uma QAI aceitável, os valores obtidos experimentalmente não podem ultrapassar os valores máximos de referência. Ao analisar a Tabela 21, conclui-se que para o gabinete são detectados valores não coerentes com a legislação para o dióxido de carbono e compostos orgânicos voláteis e para a sala de aula para o dióxido de

carbono. Assim, em ambos os espaços interiores a QAI não é a adequada, por isso têm que ser tomadas medidas para a sua melhoria, principalmente quando existe ocupação.

Em relação ao conforto térmico, avaliado pela temperatura e humidade relativa, pode-se concluir que para ambas as zonas os requisitos legais não são cumpridos, devido ao facto dos valores da temperatura ou da humidade serem superiores aos máximos de referência.

3.4.5. Análise energética

Em relação aos dados energéticos, é apresentado no Anexo 1 a caracterização dos equipamentos e iluminação, que dizem respeito ao consumo de energia eléctrica e do aquecimento, a gás natural. Em relação ao consumo de energia eléctrica, realizou-se uma análise de dados cedidos pela Universidade de Aveiro para a estação de aquecimento para os anos 2005/2006, onde o Departamento de Ambiente e Ordenamento apresenta um consumo mensal de 14229 kWh. Assim, fazendo uma estimativa para o gabinete e sala de aula, os consumos são cerca de 161,21 e 651,61 kWh respectivamente. Este cálculo foi realizado através da estimativa do consumo de cada espaço interior associado ao seu volume específico, sabendo o consumo total do Departamento de Ambiente (volume total). Para o consumo de gás natural, foram consultados dados de 2001, onde se estimou para a estação de aquecimento, um consumo mensal de 1375 m³ de gás natural para o departamento. Assim, para o aquecimento do gabinete e sala, não considerando perdas de calor, obteríamos um consumo de 9,78 e 62,97 m³ respectivamente.

3.4.6. Clima exterior

No que se refere aos dados exteriores é importante analisar as condições meteorológicas, de acordo com a velocidade e direcção do vento, Figura 43. Os dados da velocidade e direcção do vento apresentados são provenientes da torre meteorológica da Universidade de Aveiro. Esta análise revela ventos dominantes de Norte e velocidade do vento média de 5,90 m.s⁻¹, com mínimo de 0,45 m.s⁻¹ no dia 7 de Março e máximo de 12,23 m.s⁻¹ no dia 5 de Março.

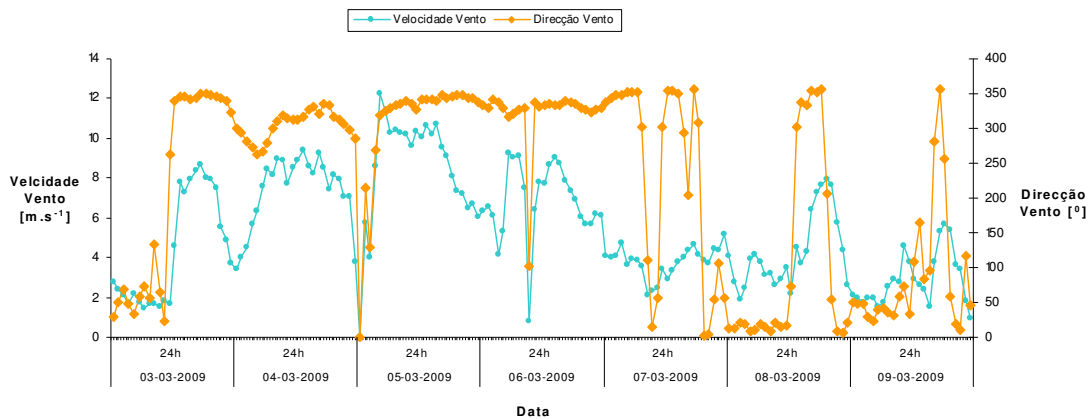


Figura 43. Velocidade e direcção do vento durante a campanha experimental.

3.5. Conclusão

Após a campanha experimental e a análise dos dados pode-se concluir que, tanto o gabinete como a sala de aula apresentam uma ventilação insuficiente. Este factor pode ser a causa de no período de ocupação serem obtidas concentrações tão elevadas de dióxido de carbono, em ambas as zonas, e de compostos orgânicos voláteis, no gabinete. De acordo com a análise gráfica na sala de aula as concentrações de dióxido de carbono apresentam uma dependência com o número de ocupantes e com as condições de medição das janelas e postigos (abertos ou fechados), ou seja, com a taxa de ventilação. Também se pode verificar, nesta análise gráfica, a variação das concentrações de ozono com a abertura ou fecho das janelas e postigos, o que revela a influência da circulação de ar do exterior para o interior.

Em relação ao conforto térmico, pode-se verificar que no período de ocupação dos dois espaços interiores, a temperatura de referência (20°C) é ultrapassada, o que significa que neste período as zonas podem-se encontrar muito quentes e desagradáveis para os seus ocupantes. Em relação à humidade relativa não é possível retirar nenhuma conclusão à luz da legislação actual, visto no RCCTE, não estar previsto nenhum valor para a humidade relativa para a estação de aquecimento, Tabela 7. Segundo Santamouris *et al.* (1998), é assumido uma situação de referência para o conforto térmico caracterizada por uma humidade de 50%. Considerando esse valor e a análise gráfica, constata-se que no gabinete a humidade ronda os 50%, mas na sala, nos períodos de utilização, existe um aumento da humidade acima dos 50%, atingindo um máximo aproximadamente de 68%.

Os valores experimentais revelam que no período de ocupação, em ambas as zonas, era oportuno recorrer-se ao aumento da renovação de ar para a diminuição da temperatura e das concentrações de dióxido de carbono e compostos orgânicos voláteis. No que se refere à monitorização da QAI foram analisados os parâmetros previstos no RSECE, excepto as PM_{10} , devido a erros na captação dos dados.

4. MODELAÇÃO NUMÉRICA DA QAI E DO CONSUMO ENERGÉTICO

Um dos principais objectivos da tese prende-se com a aplicação de um modelo numérico para a simulação das taxas de ventilação e consumos energéticos e de uma metodologia para o cálculo da QAI, e a validação dos dados experimentais. Neste sentido, o modelo EnergyPlus foi aplicado ao período da campanha experimental, permitindo o cálculo das taxas de ventilação, temperaturas, humidades relativas e consumos de energia eléctrica, pela iluminação e equipamentos, e do sistema de aquecimento. Através da determinação das taxas de ventilação foi possível aplicar uma metodologia de cálculo simplificada do transporte de poluentes do exterior para o interior.

Deste modo, procedeu-se à simulação criando um ficheiro de entrada, “Input File”, que contém os dados da simulação e um ficheiro meteorológico, “Weather File”, onde foram inseridos os dados relativos à temperatura, humidade relativa do exterior, velocidade e direcção do vento do exterior, provenientes da torre meteorológica da Universidade de Aveiro para o período estabelecido (3 a 9 de Março).

4.1. Ficheiro de entrada

No ficheiro de entrada, “Input File”, Figura 44, foram introduzidos os parâmetros da simulação, a localização do edifício, elementos da sua construção, a delimitação das zonas do piso do edifício em estudo e das respectivas aberturas para o exterior ou para outras zonas, a caracterização das zonas em estudo, relativamente aos seus ganhos internos, que inclui a ocupação, iluminação e equipamentos, à sua climatização, e por fim a descrição das características para a simulação de um sistema de ventilação natural, incluindo a descrição do fluxo de ar, caracterização de cada superfície exterior e interior, áreas de abertura e caracterização do vento.

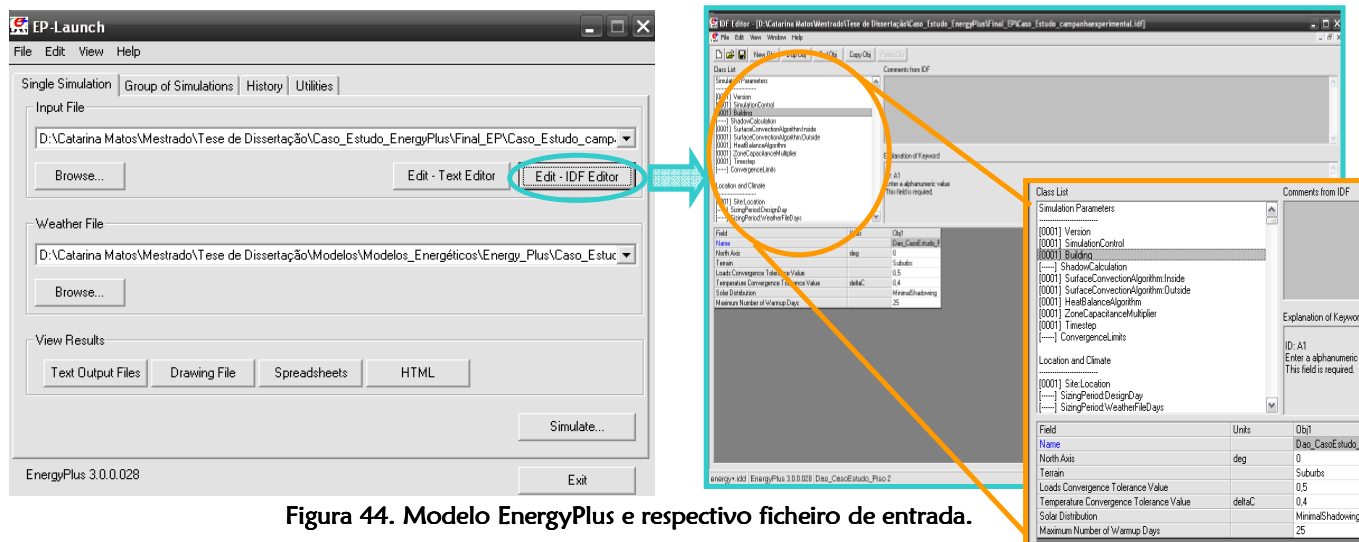


Figura 44. Modelo EnergyPlus e respectivo ficheiro de entrada.

4.2. Definição do domínio

Para a definição do domínio do caso de estudo foi considerado o piso 2 do Departamento de Ambiente e Ordenamento, pois é neste que se localizam ambas as zonas de amostragem, gabinete e sala de aula. Este foi definido pela introdução de coordenadas, e pela sua divisão em zonas, Figura 45 e 46.

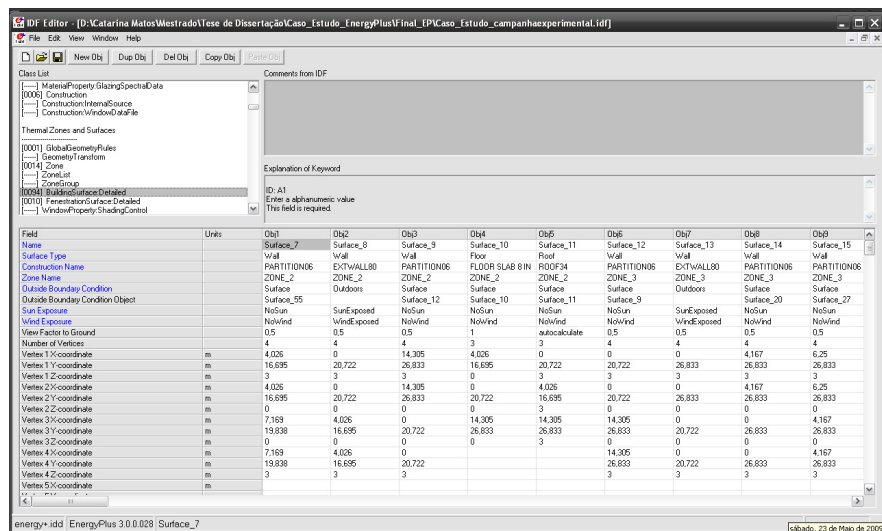


Figura 45. Modelo Energy Plus e respectivo ficheiro de entrada.

Utilizando um programa de desenho de interface, Volo View [URL 6], é demonstrado na Figura 46, o domínio definido.

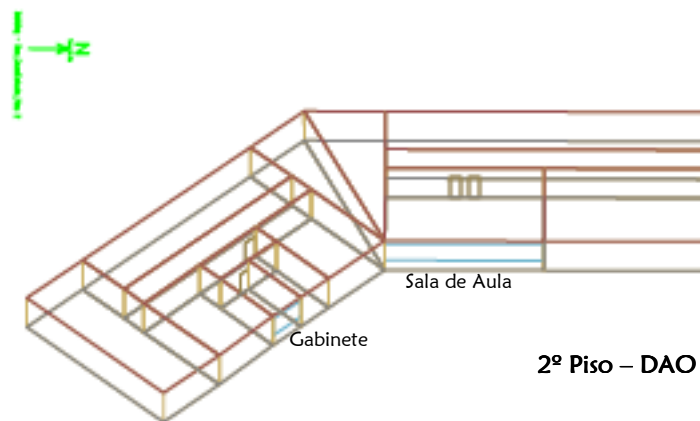


Figura 46. Representação do domínio de simulação.

4.3. Resultados

A aplicação do modelo EnergyPlus permitiu a obtenção de dados das taxas de ventilação e consumos energéticos para o período da campanha experimental (3 a 9 de Março). A aplicação de uma metodologia simplificada de cálculo permitiu obter as concentrações interiores provenientes do exterior, através de mecanismos de ventilação natural.

O “Input File”, “Weather File” e os resultados obtidos (tabelas de valores) serão disponibilizados em suporte digital.

Em relação às condições de simulação, para o gabinete considerou-se a janela e a porta fechadas e para a sala de aula os dois postigos abertos, janelas fechadas, e uma porta aberta e outra fechada.

4.3.1. Taxas de ventilação

Na simulação das taxas de ventilação, foi contabilizado o fluxo de entrada de ar do exterior pelas aberturas (janelas) das zonas em estudo. De acordo com a sua análise gráfica, Figura 47 e 48, é verificado que o gabinete apresenta valores máximos que atravessam a linha de referência, enquanto na sala isso só se verifica no dia 8 de Março. Apesar destes valores máximos, em ambas as zonas é verificado que durante a maior parte do período de ocupação as taxas de ventilação atingem valores insuficientes. Também é possível constatar uma variação das taxas de ventilação com a velocidade e direcção do vento, Figura 43.

A comparação dos dados simulados com os obtidos experimentalmente é complexa devido ao facto de apresentarem uma forma diferente de medição e apresentação, pois os primeiros são contínuos e os outros referem-se a taxas totais para um determinado período de tempo. Analisando os gráficos das Figuras 47 e 48, é importante referir que o modelo

sobrestima as taxas de ventilação. Este facto pode revelar a necessidade de validação prévia do modelo energético com os dados obtidos experimentalmente e/ou dever-se à definição das condições fronteira com dados climáticos relativos à torre meteorológica da Universidade de Aveiro e não com dados climáticos junto à superfície exterior do edifício.

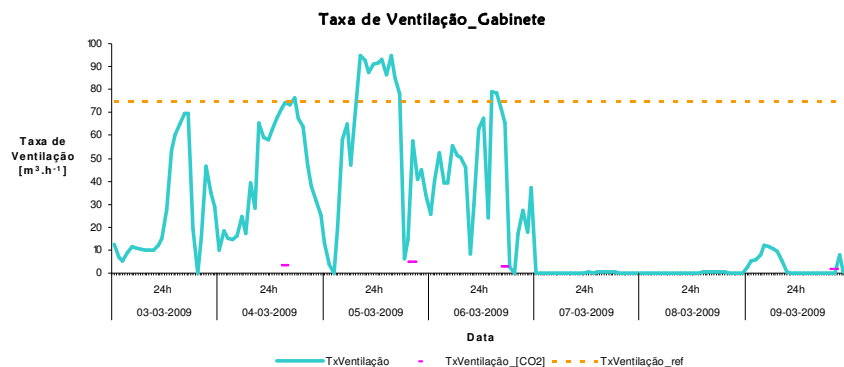


Figura 47. Taxas de ventilação para o gabinete.

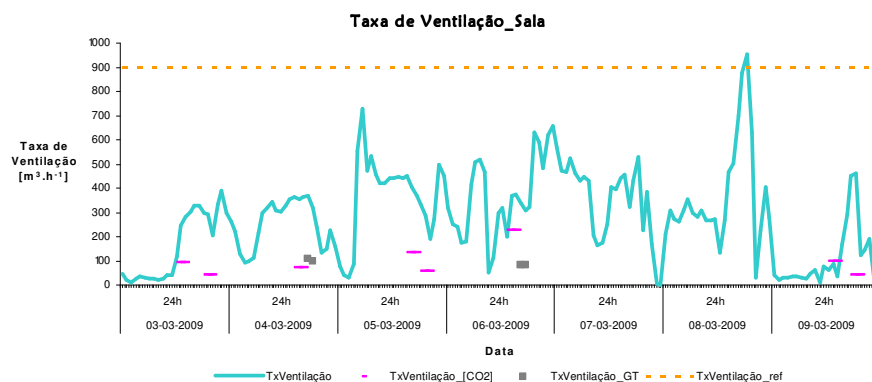


Figura 48. Taxas de ventilação para a sala de aula.

4.3.2. Transporte de poluentes e QAI

Em relação à QAI, foram determinadas, a partir das taxas de ventilação simuladas e das concentrações exteriores dos poluentes, medidas na campanha experimental, as concentrações dos poluentes transportadas do exterior para o interior. Neste estudo foram determinadas as concentrações de COV's totais, O₃, CO e PM₁₀. Estas concentrações são posteriormente comparadas com as concentrações interiores dos mesmos poluentes obtidas na campanha experimental e com o valor referência. Nesta determinação não são consideradas a influência das fontes interiores.

De acordo com a Figura 49, verifica-se que as concentrações de COV's totais provêm essencialmente do interior e não do seu transporte do exterior, visto que para o gabinete as concentrações do exterior não têm qualquer significância. Isto revela que a sua fonte é

de origem interna, por exemplo de produtos pessoais, como perfume e sprays para o cabelo, de produtos de protecção de superfícies, como vernizes e tintas, produtos de limpeza, materiais de construção e de mobiliário, e produtos de escritório, como colas, marcadores e papel.

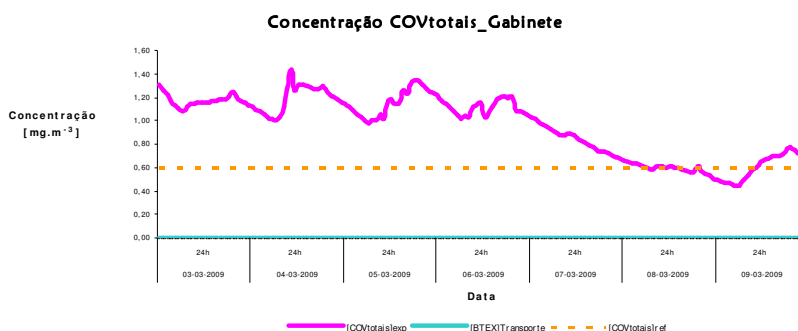


Figura 49. Transporte de COV's totais do exterior para o interior.

Para o ozono, Figura 50, apesar dos valores apresentarem uma variação muito baixa, pode ser constatado que a concentração deste poluente pode provir tanto do interior como do exterior. Isto pode ser observado devido ao facto dos valores das concentrações transportadas serem menores que as medidas no interior, o que revela que as concentrações de ozono têm que provir de mais alguma fonte, como por exemplo do interior.

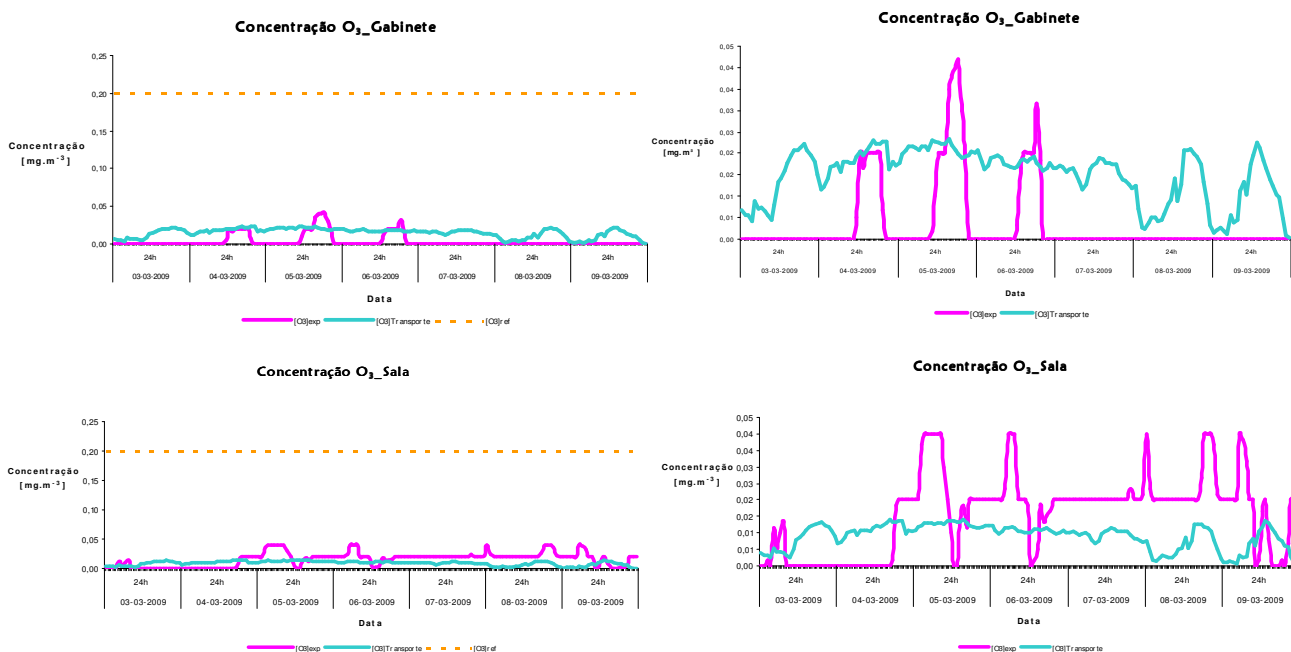


Figura 50. Comparação das concentrações de O₃ transportadas do exterior para o interior com e sem linha de referência, com as concentrações experimentais.

Para o monóxido de carbono a simulação conseguiu demonstrar uma variação muito semelhante com valores abaixo dos valores referência e próximos de zero, Figura 51.

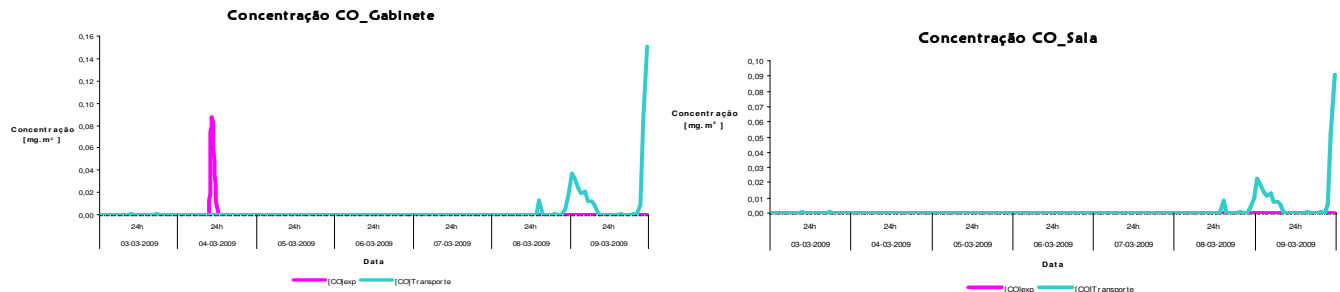


Figura 51. Comparação das concentrações de CO transportadas do exterior para o interior com as concentrações experimentais.

Apesar da ausência de dados experimentais, foram determinadas para as partículas as suas concentrações provenientes do exterior, Figura 52. Este cálculo demonstrou que as concentrações de partículas provenientes deste transporte encontram-se abaixo do valor máximo admissível. Mas por outro lado é preciso ter em conta que as partículas podem ter origem no interior e exterior (tráfego e a indústria) do edifício. Para este tipo de poluentes devem ser estudadas as suas concentrações exteriores e interiores, porque delas pode depender a aplicação e regulação de estratégias de ventilação do edifício.

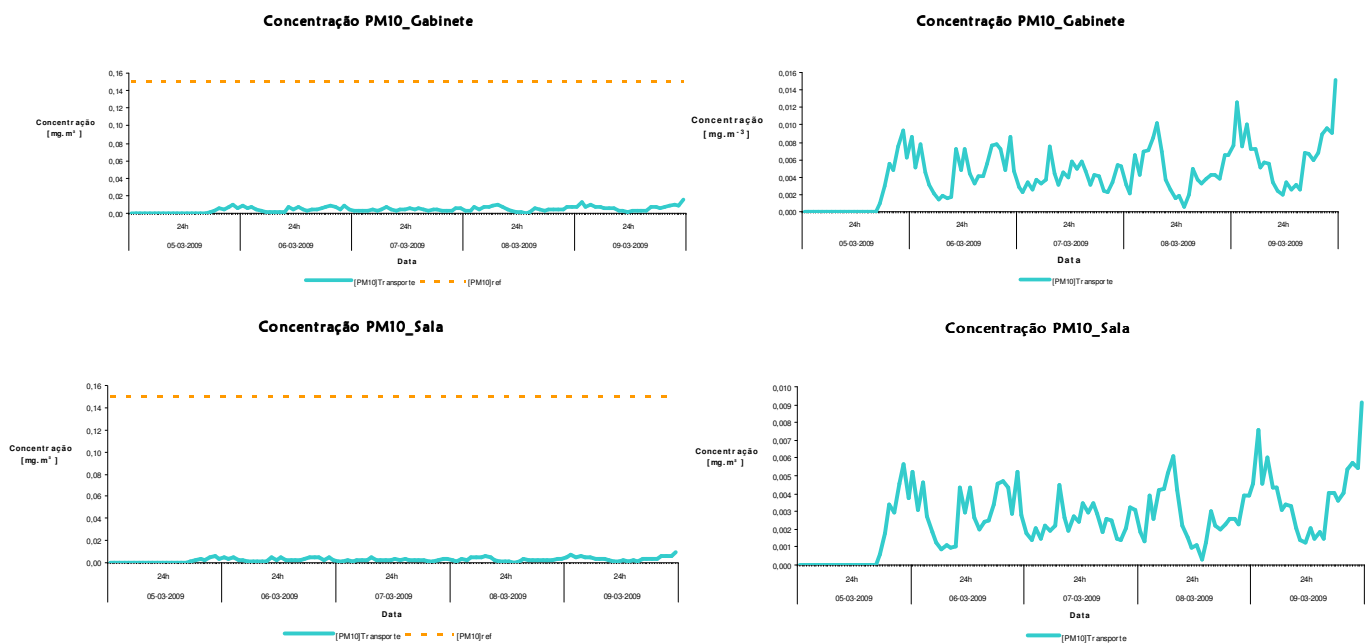


Figura 52. Concentrações de CO transportadas do exterior para o interior com e sem linha de referência.

4.3.3. Conforto térmico

Relativamente ao conforto térmico, foram analisadas a temperatura e a humidade, Figura 53, e pode-se afirmar que os resultados do modelo apresentam uma variação semelhante, nas duas zonas, o que pode significar que a utilização do modelo pode ser bastante útil para a simulação da temperatura e a humidade relativa no interior destes espaços.

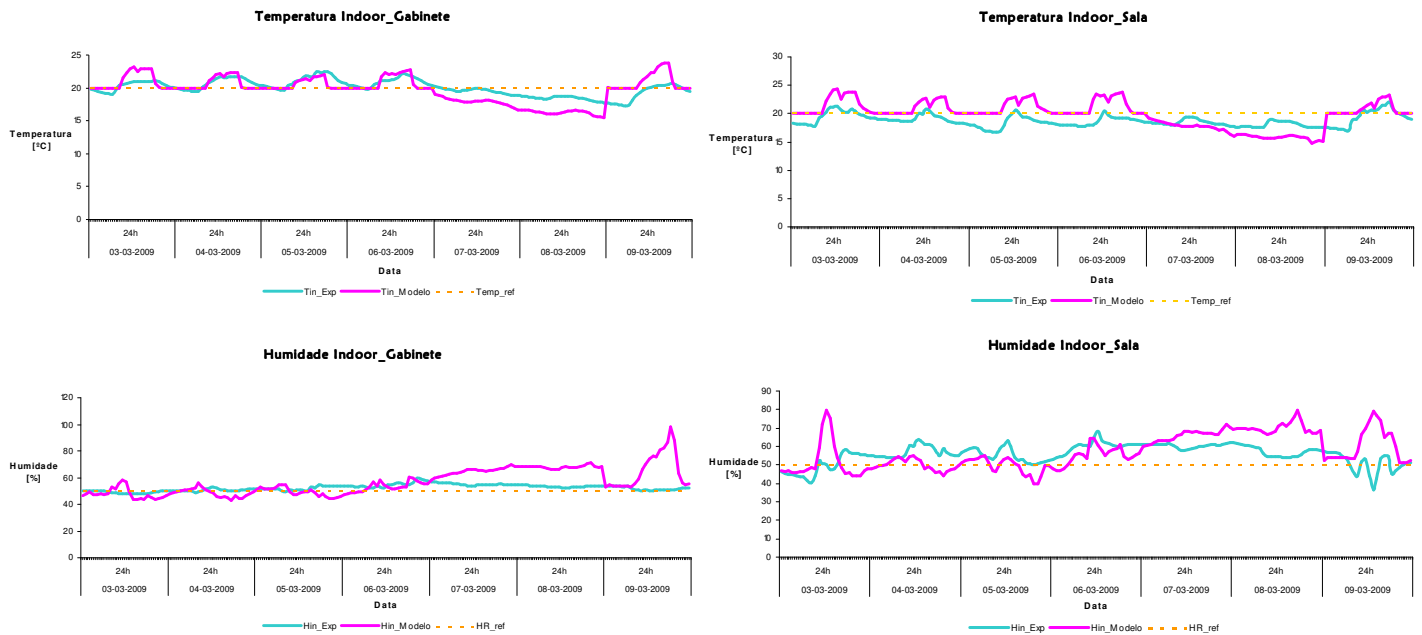


Figura 53. Comparação das variáveis de controlo obtidas no modelo, com as experimentais e de referência.

Realizando uma pequena análise estatística de correlação dos valores experimentais com os simulados, pode-se verificar que a temperatura, em ambas as zonas, apresenta uma melhor correlação, Tabela 24.

Tabela 24. Análise estatística dos valores experimentais e simulados.

	Gabinete		Sala de Aula	
	Temperatura	Humidade	Temperatura	Humidade
Correlação	0,70	0,31	0,59	0,17

4.3.4. Análise energética

Para a simulação energética foram determinados os consumos mensais de energia do edifício e das zonas em estudo. Estes consumos são relativos à energia eléctrica, consumida pela iluminação e equipamentos (computadores, datashow) e ao sistema de aquecimento,

utilizado para aquecer e manter as zonas interiores a temperatura média de 20°C, nomeadamente na estação de aquecimento (Inverno).

Na Tabela 25 são apresentados os consumos de energia eléctrica das zonas em estudo, gabinete e sala de aula. Para a realização de uma análise comparativa foram colocados nesta mesma Tabela, a estimativa dos consumos apresentados na campanha experimental.

Tabela 25. Consumos de Energia Eléctrica.

Fonte	Local	Energia Eléctrica [kWh]		Total
		Iluminação	Equipamentos	
Modelo Energético	Gabinete	16,704	144,00	160,70
	Sala de Aula	283,97	234,00	517,97
Campanha Experimental	Gabinete	-	-	161,21
	Sala de Aula	-	-	651,61

Comparando os valores dos consumos simulados com os obtidos na campanha experimental pode-se observar que estes apresentam uma estimativa com valores próximos. No gabinete aproximadamente 90% do consumo deve-se à utilização de equipamentos eléctricos (computadores, rádio), na sala de aula o maior consumo é da responsabilidade da iluminação, representado cerca de 55%.

Isto revela que a simulação energética, pode trazer mais valias no estudo de consumos energéticos e de estratégias para os reduzir.

Em relação ao sistema de aquecimento é apresentado na Figura 54, os consumos horários de energia para garantir uma temperatura no interior de 20°C.

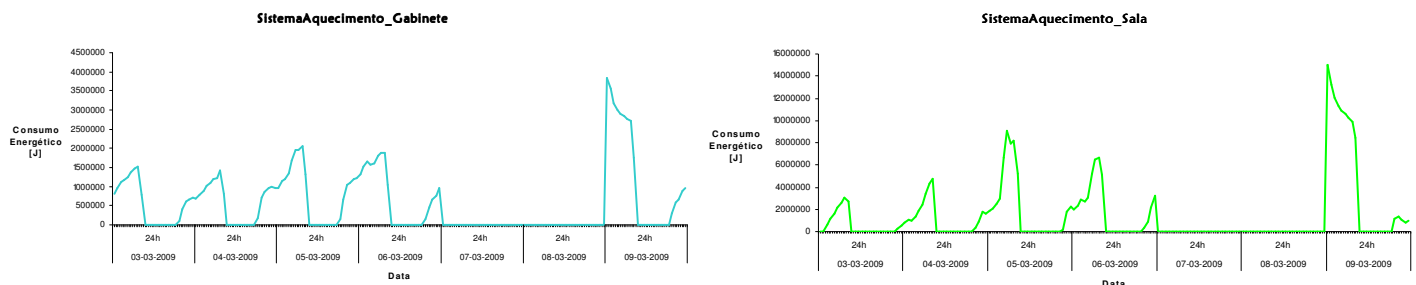


Figura 54. Consumo energético pelo sistema de aquecimento no gabinete e na sala.

Como era de esperar a sala de aula apresenta um maior consumo de energia, que pode ser explicado pela maior área que possui para aquecer e manter a 20°C.

4.4. Conclusão

A modelação energética pode-se revelar uma ferramenta muito útil para a avaliação da ventilação natural, nomeadamente na determinação das taxas de ventilação, dos parâmetros de conforto térmico e do consumo energético do edifício. Pela análise dos resultados obtidos e a sua comparação com os dados experimentais é constatado uma sobrestima das taxas de ventilação. Esta sobrestima pode significar que a utilização deste tipo de modelação necessita de uma validação prévia com os dados experimentais, e/ou pode dever-se ao facto das condições fronteira terem sido definidas com dados meteorológicos da torre da Universidade de Aveiro e não com dados próximos do edifício, ou seja, não foi contabilizado o efeito local do edifício.

Apartir das taxas de ventilação simuladas pode ser estimado o transporte de poluentes do exterior para o interior dos dois compartimentos estudados.

De acordo com a comparação dos valores experimentais com os simulados, existe uma concordância nos parâmetros de conforto térmico, temperatura e humidade, e uma proximidade nos consumos de energia eléctrica. Em ambas as zonas estudadas é verificada uma ventilação insuficiente, principalmente nos períodos de ocupação.

5. DEFINIÇÃO DE ESTRATÉGIAS PARA UM EDIFÍCIO SUSTENTÁVEL

Neste capítulo pretendeu-se definir e simular algumas estratégias de ventilação natural aplicadas aos dois compartimentos em estudo para a optimização do binómio QAI e energia para a obtenção de um edifício mais sustentável.

Os seguintes cenários foram definidos para as zonas de amostragem e simulados através do modelo EnergyPlus, Tabela 26. Para a sala de aula são apresentados os cenários 1, 2, 3 e 4, e para o gabinete os cenários 5 e 6.

Tabela 26. Cenários de estratégias de ventilação natural.

Cenário	Condições	
	Gabinete	Salada Aula
Caso de Estudo	Janela Fechada; Porta Fechada.	Dois Postigos Abertos; Janelas Fechadas; Uma Porta Fechada e outra Aberta.
Cenário 1	-	Dois Postigos Abertos; Uma Janela Aberta e as Restantes Fechadas; Uma Porta Fechada e outra Aberta.
Cenário 2	-	Dois Postigos Abertos; Duas Janelas Abertas e as Restantes Fechadas; Uma Porta Fechada e outra Aberta.
Cenário 3	-	Dois Postigos Abertos; Quatro Janelas Abertas; Uma Porta Fechada e outra Aberta.
Cenário 4	-	Postigos Fechados; Quatro Janelas Fechadas; Uma Porta Fechada e outra Aberta.
Cenário 5	Janela Aberta; Porta Fechada.	-
Cenário 6	Se o Gabinete tivesse um postigo em vez de uma janela; Porta fechada.	-

5.1. Resultados da modelação numérica

5.1.1. Taxas de ventilação

De acordo com a lógica que quando a área de abertura é maior, aumenta a quantidade de ar que passa através dela, pode-se afirmar, tanto na sala de aula como no gabinete, que quando se aumenta o número de áreas abertas para o exterior também aumenta a taxa de ventilação. Comparando as taxas de ventilação simuladas com as de referência, Figuras 55 e 56 verifica-se que os cenários mais favoráveis na sala de aula são o 1, 2 e 3, e no gabinete o 5 e o 6.

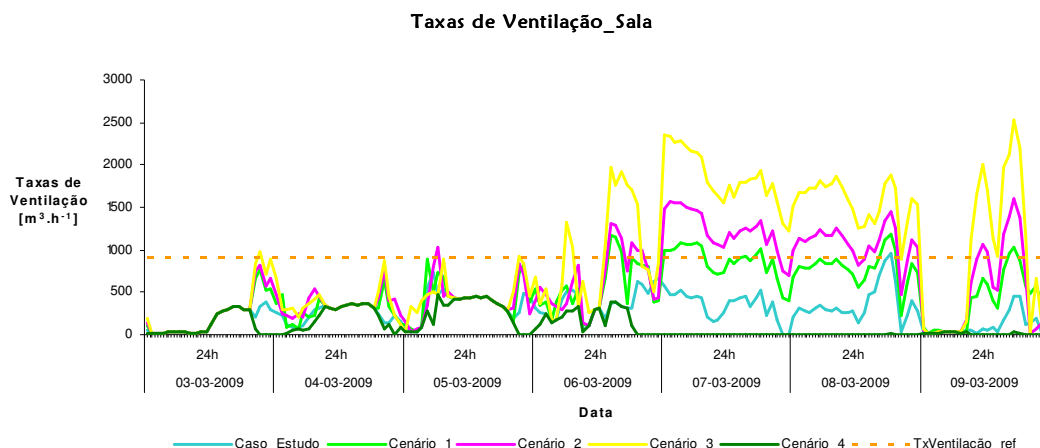


Figura 55. Taxas de ventilação de acordo com os vários cenários, para a sala de aula.

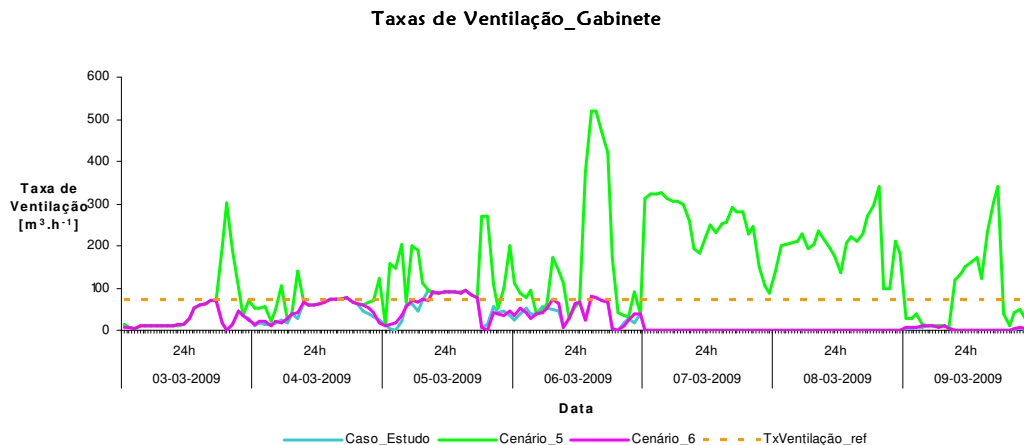


Figura 56. Taxas de ventilação de acordo com os vários cenários, para o gabinete.

5.1.2. Transporte de poluentes e QAI

Depois da análise das taxas de ventilação para cada cenário, e tendo em conta que o principal propósito da ventilação é de renovar e melhorar a QAI, interessa analisar qual a influência do transporte de ar do exterior para o interior nessa renovação. Para esta análise, procedeu-se a uma metodologia semelhante à da determinação das concentrações de cada poluente transportadas, através das taxas de ventilação simuladas.

Para os COV's totais, o seu transporte do exterior não tem significado, pois apresenta valores muito próximos de zero para ambas as zonas, e não se consegue visualizar a sua variação. Para os COV's totais conclui-se que as suas principais fontes provêm do interior, como já tinha sido detectado anteriormente.

Em relação ao transporte de O_3 e PM_{10} , Figuras 57 e 58, verifica-se que o aumento da concentração de poluente no interior varia com o aumento das taxas de ventilação, que por sua vez, aumenta com a área das aberturas.

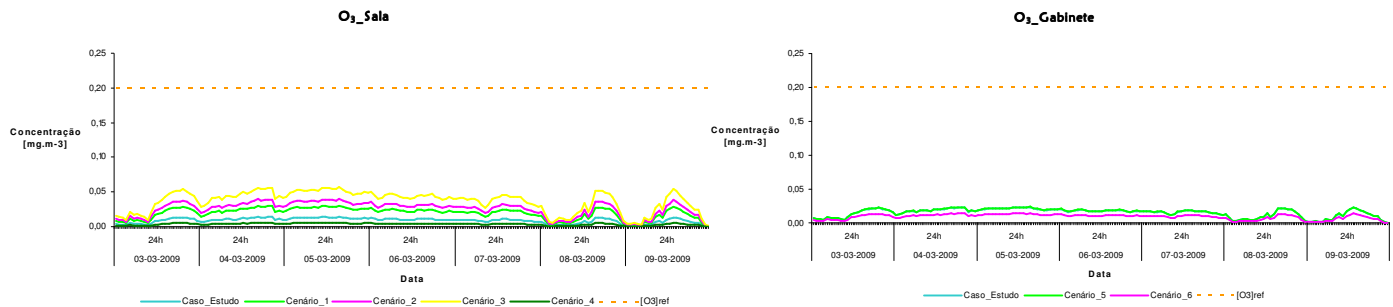


Figura 57. Dados relativos ao transporte de O_3 para os vários cenários.

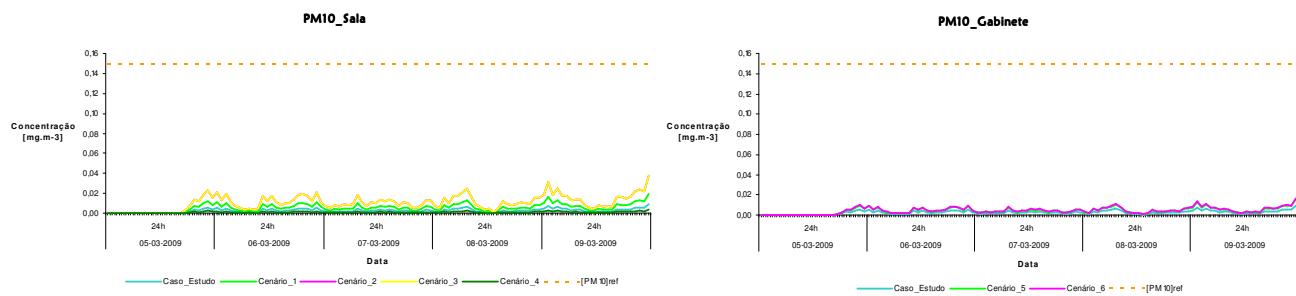


Figura 58. Dados relativos ao transporte de PM_{10} para os vários cenários.

Para o CO o seu transporte não foi representado porque os seus valores são muito próximos de zero e a sua variação não confere significância para esta análise.

5.1.3. Conforto térmico

Para cada cenário foram simulados os parâmetros de conforto térmico, a temperatura e a humidade, Figuras 59 e 60.

As temperaturas mais baixas na sala de aula e no gabinete são conseguidas pelos cenários 3 e 5, respectivamente, devido ao facto destes apresentarem uma maior área de abertura para o exterior e maior renovação de ar. Em ambos os gráficos, no período de ocupação, os cenários propostos e o caso de estudo revelam uma temperatura superior à temperatura de referência.

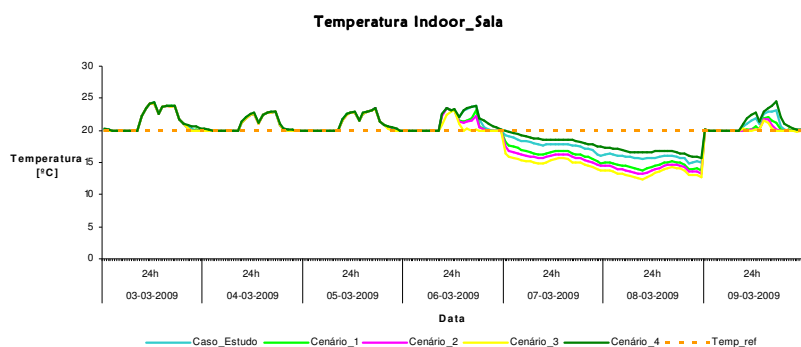


Figura 59. Comportamento da temperatura de acordo com vários cenários, para a sala de aula.

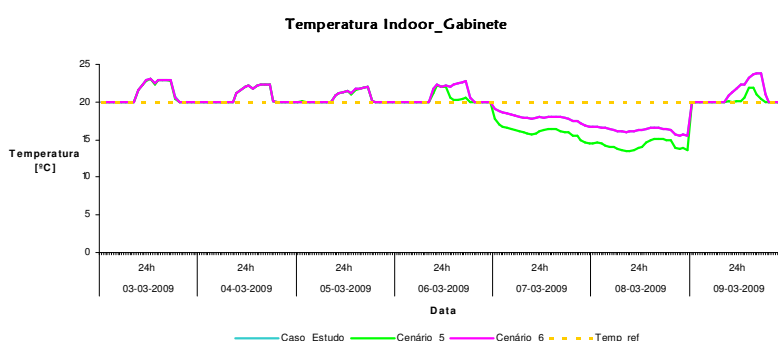


Figura 60. Comportamento da temperatura de acordo com vários cenários, para o gabinete.

Os valores da humidade, para ambas as zonas, apresentam um comportamento semelhante aos do caso de estudo, Figuras 61 e 62. Também se pode verificar que os cenários com maiores áreas abertas apresentam valores superiores, isto sucede devido ao facto da humidade exterior ser superior à interior, Figuras 40 e 42. Assim, o cenário mais favorável seria o cenário 4 (zona fechada).

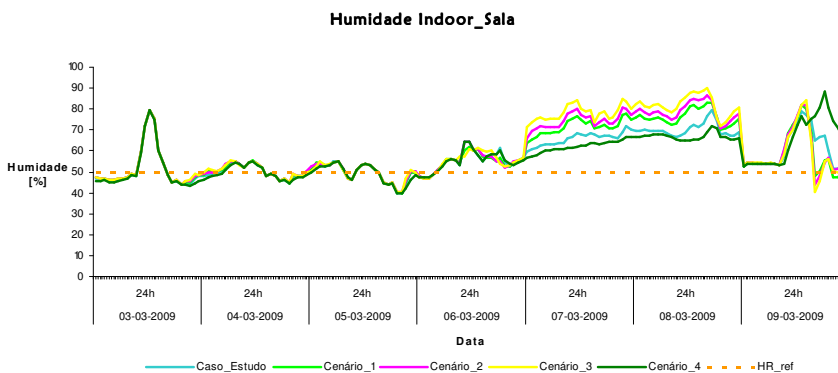


Figura 61. Comportamento da humidade de acordo com vários cenários, para a sala de aula.

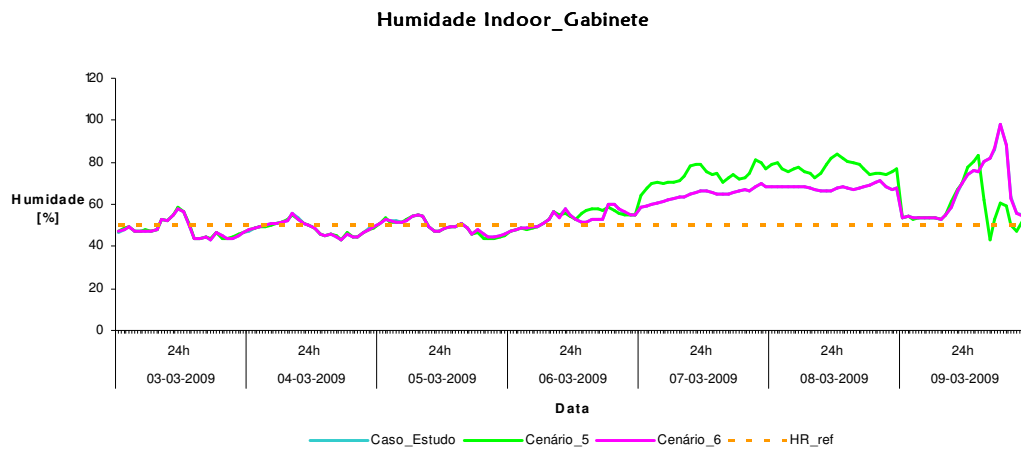


Figura 62. Comportamento da humidade de acordo com vários cenários, para o gabinete.

D. Sistema de aquecimento

Se as taxas de ventilação são responsáveis pela diminuição das temperaturas no interior (arrefecimento), então taxas de ventilação maiores aumentam a capacidade de arrefecimento, o que quando se tem um equipamento para aquecer o espaço interior, pode implicar gastos de energia.

De acordo com a simulação, este sistema de aquecimento funciona com o objectivo de climatizar as zonas a 20°C. Assim sendo a abertura de uma janela ou postigo, que provoca a ventilação e consequentemente o arrefecimento do espaço, pode implicar gastos desnecessários de energia. Pois quando a zona arrefece, ou perde calor, o sistema de climatização tem necessidade de colmatar essa perda, consumindo mais energia para produzir esse calor. Tendo em vista os cenários em estudo e a metodologia acima descrita, os cenários 3 (sala) e 5 (gabinete) apresentam maiores consumos de energia, Figuras 63 e 64.

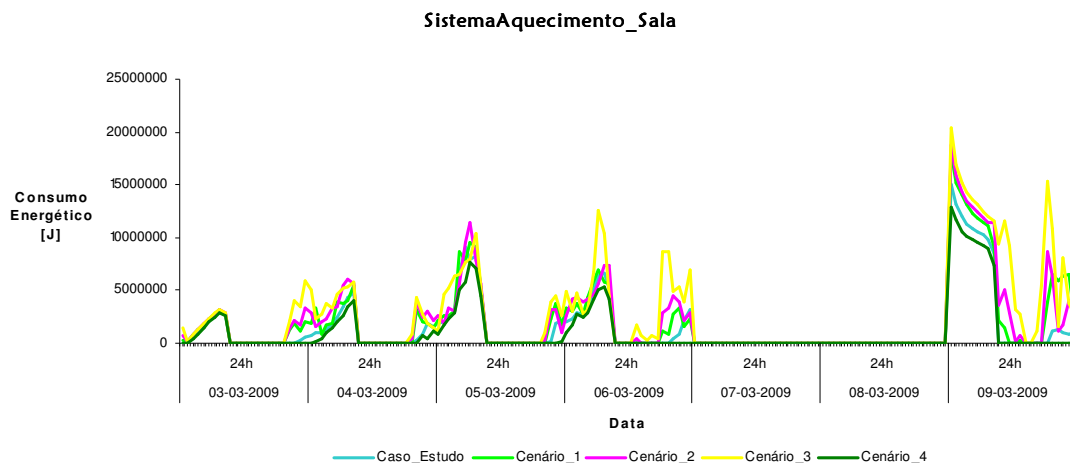


Figura 63. Consumo de energia térmica de acordo com os vários cenários, para a sala.

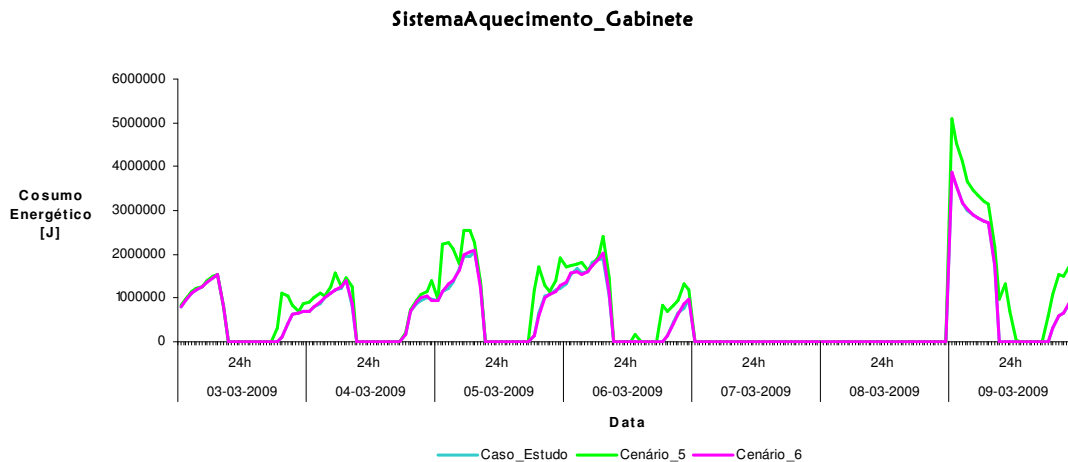


Figura 64. Consumo de energia térmica de acordo com os vários cenários, para o gabinete.

5.2. Conclusão

Após a utilização da simulação energética para a avaliação da ventilação natural, verifica-se que esta apresenta potencialidades para o estudo de possíveis estratégias de ventilação natural a adoptar no edifício em questão.

A simulação com o modelo Energy Plus, para os cenários propostos, permitiu averiguar que as diferentes estratégias de ventilação natural influenciam directamente outros parâmetros, tal como as taxas de ventilação, a temperatura e humidade interiores, a concentração dos poluentes e os consumos energéticos. Assim, verificou-se que estes parâmetros aumentam com o aumento da área aberta das zonas em questão, janelas e portas.

De acordo com os cenários propostos para a sala de aula os resultados indicam que se deve manter no mínimo os dois postigos abertos, depois e durante o período de ocupação, referente ao caso de estudo. Apesar de se verificar um ligeiro aumento do consumo de energia, a abertura de uma janela, cenário 1, permite uma renovação de ar mais eficiente e uma redução das concentrações de CO₂. Para o gabinete, o cenário 6, é considerado o mais favorável, pois o facto de substituir a janela por um postigo, aumentaria as taxas de ventilação a nível adequado, mantendo o consumo de energia sem grandes alterações e as concentrações dos poluentes dentro dos limites.

6. CONCLUSÃO

A ventilação natural apresenta um papel importante na garantia da QAI e do conforto térmico dos ocupantes de um edifício. Neste contexto, esta funciona como uma estratégia de promoção da QAI baseada na renovação de ar e na diluição da concentração dos poluentes no interior do edifício. A quantidade de ventilação necessária para garantir uma QAI aceitável depende da concentração e do tipo de fonte poluente dominante num determinado espaço e dos poluentes que podem resultar do transporte do ar do exterior para o interior. É nesse sentido que a ventilação natural desenvolve uma acção de controlo dos níveis de poluição no interior dos edifícios, na distribuição do fluxo de ar e no arrefecimento passivo. As estratégias da ventilação podem influenciar significativamente a concentração dos poluentes no interior como também as necessidades energéticas dos edifícios. Deste modo, as características do ar exterior e a capacidade de diluição do ar ventilado são determinantes para a concentração dos poluentes no interior, e consequentemente, para a quantidade de energia requerida para manter o conforto térmico desejado. Assim, uma boa estratégia de ventilação deve considerar uma grande diversidade de poluentes, e as suas características, fontes, e sua relação com a ocupação, para permitir uma QAI aceitável com o mínimo consumo de energia.

De acordo com estes factos procedeu-se à avaliação da performance do edifício do Departamento de Ambiente e Ordenamento, ou mais especificamente de duas zonas interiores, um gabinete e uma sala de aula, utilizando ferramentas e técnicas experimentais. A campanha experimental realizada baseou-se na monitorização da QAI, determinação das taxas de ventilação, no conforto térmico, pela análise a temperatura e humidade relativa e nos consumos energéticos destas zonas. Em ambos os espaços interiores a QAI não é a adequada, principalmente no período de ocupação. Este facto deve-se essencialmente às concentrações de poluentes com fontes interiores ou dos próprios ocupantes. Em relação ao conforto térmico, avaliado pela temperatura e humidade relativa, pode-se concluir que estes não cumprem os requisitos legais definidos. Sendo que na estação de aquecimento (Inverno), para a temperatura é definido na legislação (RCCTE) um valor de referência de 20°C, mas para a humidade o mesmo não acontece. Por isso foi definido, segundo Santamouris *et al.* (1998), um valor de referência de 50%. Estes resultados podem derivar da ventilação insuficiente, que também foi detectada pela determinação das taxas de ventilação pelo método do gás traçador e análise das concentrações de CO₂. Estes resultados revelam que têm de ser tomadas medidas adicionais de ventilação ou implementadas estratégias para a sua melhoria. A campanha experimental e a modelação

energética são ferramentas que se complementam. Mesmo assim, é importante realçar que a aplicação do modelo energético, EnergyPlus, apresenta um grande potencial na simulação destes parâmetros. Através da modelação energética procedeu-se à determinação das taxas de ventilação, dos parâmetros de conforto térmico e do consumo energético do edifício. Em relação às taxas de ventilação é importante referir que o modelo sobrestima os seus valores. Este facto pode revelar a necessidade de validação prévia do modelo energético com os dados obtidos experimentalmente e/ou dever-se à definição das condições fronteira com dados climáticos relativos à torre meteorológica da Universidade de Aveiro e não com dados climáticos junto à superfície exterior do edifício. De acordo com estes resultados e da sua comparação com os valores experimentais e de referência (legislados), é concordante a apresentação, de uma ventilação insuficiente, em ambas as zonas mas principalmente na sala de aula, nos períodos de ocupação, em que o dióxido de carbono apresenta valores muito elevados e superiores aos máximos de referência, e as taxas de ventilação inferiores ao valor mínimo de referência. Em relação ao conforto térmico estas zonas também apresentam alguma carência visto que para a estação de aquecimento (Inverno) a temperatura e a humidade encontram-se acima dos valores previstos, no período de ocupação. Apartir das taxas de ventilação simuladas procedeu-se à determinação do transporte dos poluentes do exterior para o interior do edifício. Em relação ao transporte dos poluentes do exterior para o interior, não foi conectada uma grande relevância, visto que os valores se encontram abaixo dos valores estabelecidos. O mesmo não se pode afirmar dos poluentes que provém essencialmente de fontes interiores, nomeadamente do CO₂ e dos COV's totais, que revelaram valores superiores aos de referência. A origem destes poluentes está intrinsecamente dependente dos ocupantes e da sua actividade, da utilização de produtos pessoais, de produtos de protecção de superfícies, como vernizes e tintas, produtos de limpeza, materiais de construção e de mobiliário, e produtos de escritório, como colas, marcadores e papel.

Com o objectivo de otimizar a QAI e o consumo energético foram desenvolvidos diferentes cenários. Estes cenários distinguem-se por diferentes áreas de abertura, de janelas e portas, que influencia directamente as taxas de ventilação. A escolha da estratégia reflecte-se e inclina-se para o cenário em que os quatro parâmetros delineados, nomeadamente, as taxas de ventilação, a QAI, o conforto térmico e o consumo energético, apresentarem um maior grau de sintonia. Observou-se que o aumento da área de abertura entre o interior e exterior (abertura de uma janela, postigo ou porta) causa um aumento das taxas de ventilação, que consequentemente aumentam o transporte de poluentes do

exterior para o interior e o consumo de energia proveniente do sistema de climatização. De acordo com os cenários propostos e respectiva análise, propõe-se manter os dois postigos abertos, durante o período de ocupação da sala de aula. Apesar de se verificar um ligeiro aumento do consumo de energia, a abertura de uma janela, cenário1, permitiria uma renovação de ar mais eficiente e uma redução das concentrações de CO_2 , nos períodos de maior ocupação. O estudo também revela que a abertura de mais janelas, iria aumentar em demasiado a taxa de ventilação, o transporte de poluentes e o consumo de energia, o que não é adequado nem otimizador. Para o gabinete o cenário mais favorável implicaria a substituição da janela por um postigo, cenário 6, aumentando as taxas de ventilação a um nível adequado e mantendo o consumo de energia térmica sem grandes alterações e as concentrações dos poluentes dentro dos limites.

A optimização do caudal de ar trocado entre o exterior e interior é importante para ser estabelecida uma combinação entre o baixo consumo de energia e a QAI adequada e admissível, e daí resultarem taxas de ventilação mais correctas e adequadas. Desta forma, a utilização da ventilação natural nos edifícios torna-se muito atractiva, devido ao facto desta garantir a QAI e o conforto térmico de um determinado espaço.

Os modelos energéticos, como o EnergyPlus, associados a uma metodologia de cálculo das concentrações de QAI mostraram ser uma mais valia na definição de estratégias de optimização do binário QAI e energia dos edifícios. É igualmente de salientar a importância das condições meteorológicas de fronteira utilizadas no modelo energético, já que estas influenciam os resultados das simulações. A utilização de um modelo CFD (Computational Fluid Dynamics) permitiria ter uma informação mais aproximada da realidade no exterior do edifício (por exemplo junto às paredes do edifício).

No futuro este estudo poderá ser aprofundado, através de um exercício idêntico ao apresentado para a estação de arrefecimento (Verão), o estudo da integração de novas soluções estruturais, medidas e estratégias para melhorar a ventilação natural, conforto térmico e eficiência energética do edifício, e a possibilidade da utilização de estratégias de ventilação mecânica.

7. BIBLIOGRAFIA

Alloca, C.; Chen, Q. e Glicksman, L., 2003. Design analysis of single-sided natural ventilation. Elsevier – Energy and Buildings, Volume 35, 8ª Edição, 785-795.

Baptista, F.; Bailey, B.; Randall, J., e Meneses, J., 1999. Greenhouse Ventilation rate: Theory and Measurement with Tracer Gas Techniques. Silsoe Research Institute. Elsevier – Journal of Agricultural Engineering Research, Volume 72, 4ª Edição, 363-374.

Borduni, R., 2006. Simulação Computacional para Análise da Eficiência Energética em Edificações. Projecto de Graduação. Universidade de Brasília, Faculdade da Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica.

Budaiwi, I. e Al-Homoud, M., 2001. Effect of ventilations strategies on air contaminant concentrations and energy consumption in buildings. Wiley InterScience – International Journal of Energy Research, Volume 25, 12ª Edição, 1073 – 1089.

Chen, Z. e Haves, J., 2001. Strategies for coupling energy simulation and computational fluid dynamics programs. Seventh International Conference, Rio de Janeiro, Brasil. Building Simulation.

CIBSEAM10, 1997. Natural ventilation in non-domestic buildings. Applications Manual. Chartered Institute of Building Services Engineers.

Costa, M.; Borrego, C., 2008. Modelação de microescala da exposição a poluentes atmosféricos em áreas urbanas. Universidade de Aveiro.

Dols, W. e Persily, A., 1995. A study of ventilation measurement in an office building. Airflow performance of building envelopes, components and systems. American Society for testing and materials, Philadelphia.

EC, 2003. Ventilation, Good Indoor Air Quality and Rational Use of Energy. Report No 23. European Collaborative Action Urban Air, Indoor Environment and Human Exposure.

Environment and Quality of Life. European Commission. Directorate Joint Research Centre – Institute for Health & Consumer Protection. EUR 20741 EN.

Etheridge, D., Sand Berg, M., 1996. Building Ventilation – Theory and Measurement, John Wiley & Sons.

Fanger, O., 1996. The philosophy behind ventilation: past, present, and future. Indoor Air' 96, Volume 4, 3-12.

Ghiaus, C.; Allard, F.; Santamouris, M.; Georgakis, C.; Roulet, C.; Germano, M.; Tillenkamp, K.; Heijmans, N.; Nicol, F.; Maldonado, E.; Almeida, M.; Guarracino, G. e Roche, L., 2005. Natural ventilation in urban areas: results of the European Project URBVENT Part 1: Urban Environment. Building and Environment Journal.

Graça, G.; Linden, P. e Book, M., 2005. Design of the natural ventilation system for the new San Diego children's museum. Ninth international IBPSA conference, Montréal, Canadá. Building Simulation.

Hansen, S.; Burroughs, H., 2004. Managing indoor air quality. The Fairmont Press, Inc., 3ª Edição.

Husaunndee, A.; Jreijiry, D.; Millet J. e Villenave J., 2004. Ventilation control strategies. EC- RESHYVENT project. Département Développement Durable – Centre Scientifique et Technique du Bâtiment.

Incropera, F. e Witt, D., 1990. Fundamentals of heat and mass transfer. New York: John Wiley.

Indoor Air Pollution – An Introduction for Health Professionals. American Lung Association, American Medical Association, U.S. Consumer Product Safety Commission, and U.S. Environmental Protection Agency.

Leslie, G. e Lunau, F., 1992. Indoor Air Pollutants – Problems and Priorities. Cambridge, University Press.

Li, Y. e Chen, Z., 2003. A balance-point method for assessing the effect of natural ventilation on indoor particle concentrations. Elsevier – Atmospheric Environment, Volume 37, 30ª Edição, 4277 – 4285.

Linden, P., 1999. The fluid mechanics of natural ventilation. Annual Review of Fluid Mechanics, Volume 31, 201-238.

Lunau, F. e Reynolds, G., 1990. Indoor Air Quality and Ventilation. Selper, London.

Pan, Y.; Yin, R. e Huang, Z., 2008. Energy modelling of two office buildings with data center for green building design. Elsevier – Energy and Buildings, Volume 40, 7ª Edição, 1145-1152.

Paul, W. e Taylor, P., 2008. A comparison of occupant comfort and satisfaction between a green building and a conventional building. Elsevier – Building and Environment, Volume 43, 1858 - 1870.

Pinho, A., e Branco, A., 2005. Estudo e diagnóstico da Qualidade do Ar Interior da Biblioteca da UA. Universidade de Aveiro.

Reardon, J.; Atif, M. e Shaw, C., 2002. Tracer gas measurements for ventilation, air movement and air infiltration in a four-sided atrium office building. National Research Council – Institute for Research in Construction, Canadá. International Journal of Ventilation, Volume 1, nº 1, 13 – 22.

Santamouris, M.; Alvarez, S.; Dascalaki, E.; Guarracino, G.; Maldonado, E.; Sciuto, S. e Vandaele, L., 1998. Natural ventilation in buildings – A design handbook. Altener Programme of the European Commission, Directorate General XVII, for Energy. James and James, ISBN 1873936729, 1-7.

Sharpe, M., 2004. Safe as houses? Indoor air pollution and health. Journal of Environmental Monitoring, Volume 6, 47N- 49N.

Silva, F., 2004. Ventilação Natural dos Edifícios – Turbulência Atmosférica. Tese de Doutoramento elaborada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

Spengler, S. e Chen, Q., 2000. Indoor air quality factors in designing a healthy building. Annual Review of Energy & the Environment, Volume 25, 567-600.

Vanhee, L.; Nelis, H. e Coenye, T., 2008. Enumeration of airborne bacteria and fungi using solid phase cytometry. Elsevier – Journal of Microbiological Methods, Volume 72, 1ª Edição, 12–19.

Tirone, L., 2009. Website: <http://www.construcaosustentavel.pt/>.

(2008) Care for Your Air: A Guide to Indoor Air Quality. Environmental Protection Agency – United States Environmental.

Website: <http://www.epa.gov/iedweb00/pubs/careforyourair.html>

Websites

URL 1: OMS – Organização Mundial da Saúde: <http://www.euro.who.int/air> (Página 4)

URL 2: Deutsche Energie-Agentur GmbH (DENA): www.eu-greenbuilding.org (Página 5)

URL 3: EnergyPlus: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>

URL 4: APA – Agência Portuguesa do Ambiente: <http://www.apambiente.pt/>

URL 5: ADENE – Agência para a Energia: <http://www.adene.pt/>

URL 6: Volo View: <http://usa.autodesk.com/>

URL 7: Bus ++:

http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/software.cfm/ID=32/pagename_submenu=energy_simulation/pagename_menu=whole_building_analysis/pagename=subjects

URL 8: Design Advisor: <http://designadvisor.mit.edu/design/>

URL 9: DesignBuilder: <http://www.designbuilder.co.uk/>

URL 10: NewQUICK: <http://www.newquick.com/>

URL 11: Microsoft Virtual Earth: <http://www.microsoft.com/maps/>

Anexo I

Caracterização das Zonas de amostragem – Interior

Sala de Aula

Elementos		Caracterização/ Descrição
Volume da Sala de Aula		Volume = 298,52 m ³
Equipamentos e Acessórios	Mesas	Número: 24 Dimensões: 0,60x1,20x0,70 m Número: 2 Dimensões: 0,60x0,70x0,70 m Material: Madeira (base) e ferro (suporte)
	Cadeiras	Número: 48 Material: Madeira+ferro
	Datashow	Marca: Epson Modelo: EMP-X3
	Retroprojector	Marca: EuroLum
	Computador	-
	Quadro	Material: PVC branco Dimensões: 1,2x2,4m
	Tela	Numero: 1 Dimensões: 1,79x2,02m Material: Tecido
Aberturas para o exterior e interior do edifício	Portas (Sala <-> Interior do Edifício)	Número: 2 Dimensão de cada porta: 2,08x0,84m Material: Madeira
	Janelas (Sala <-> Exterior)	Número: 4 grandes Dimensões: 1,69x1,645m Número: 4 pequenas Dimensões: 1,69x1,01m Material: Vidro Simples e alumínio de cor preta nos bordos
	Postigos (Sala <-> Exterior)	Número: 2 Dimensões: x1,645 Material: Vidro+Alumínio preto
Iluminação	Iluminárias	Marca: Philips Número: Tecto: 16 Iluminárias com 2 lâmpadas (Total:32 lâmpadas) Quadro: 2 Iluminárias com 1 lâmpada (Total: 2 lâmpadas) Tipo: Tubulares fluorescentes Potência de cada lâmpada: 58 W
Sistema de AVAC	Aquecimento	Tipo: Radiadores Número: 4 Filamentos de cada radiador: 10 Sistema: Caldeira (Aquecimento de água) Caracterização: 5 níveis de aquecimento Tipo Combustível: Gás Natural
Aspectos Estruturais e Térmicos	Paredes	Espessura exterior: 0,30m Espessura interior: 0,14 m Altura: 3m Tipo e cor pintura: branco
	Sistemas solares passivos e de protecção solar	Número: 8 sistemas de protecção solar (1 sistema = 4 painéis por janela) Material: Amianto Dimensões painel pequeno: 0,3x0,91 e esp=0,01m (4 sistemas) Dimensões painel grande: 0,3x1,56 e esp=0,01m (4 sistemas) Forma/Posição: inclinação de 45º

Nota: Parede a meio da sala com uma altura de 3m largura de 1,85m e espessura de 0,425m.

Gabinete

Elementos		Caracterização/ Descrição	
Volume do Gabinete		Volume = 46,37 m³	
Equipamentos e Acessórios	Mesas	Número: 2 Material: Madeira (base) e ferro (suporte) Secretaria+Mesa de apoio	
	Cadeiras	Número: 6 Material: tecido (base) e alumínio (suporte)	
	Estantes	Número: 6 Material: Madeira	
	Livros	Estantes completas	
	Computador	-	
	Impressora	No exterior do Gabinete (a 1,60m da porta do gabinete)	
	Scanner	-	
	Rádio	-	
Aberturas para o exterior e interior do edifício	Portas	Número: 1 Dimensões: 2,05x1m	Material: Madeira
	Janelas	Número: 1 pequena (1,69x1,01m) 1 grande (1,69x1,645m) Material: Vidro+Alumínio preto	
Iluminação	Iluminárias	Marca: Phiplips Número: Tecto: 1 Iluminárias com 2 lâmpadas (Total:2 lâmpadas) Tipo: Tubulares fluorescentes Potência de cada lâmpada: 58 W	
Sistema de AVAC	Aquecimento	Tipo: Radiadores Número: 1 Filamentos de cada radiador: 10 Sistema: Caldeira (Aquecimento de água) Caracterização: 5 níveis de aquecimento Tipo Combustível: Gás Natural	
	Ar Condicionado	-	
Aspectos Estruturais e Térmicos	Paredes	Espessura exterior: 0,30m Espessura interior: 0,14 m Altura: 3m Tipo e cor pintura: branco	
	Sistemas solares passivos e de protecção solar	Número: 8 sistemas de protecção solar (1 sistema=4 painéis por janela) Material: Amianto Dimensões painel pequeno: 0,3x0,91 e esp=0,01m (4 sistemas) Dimensões painel grande: 0,3x1,56 e esp=0,01m (4 sistemas) Forma/Posição: inclinação de 45º	

Limpeza

Na limpeza da sala de aula e do gabinete foram utilizados produtos comuns para a limpeza do chão, vidros e quadro.

Anexo II

Análise gráfica – QAI

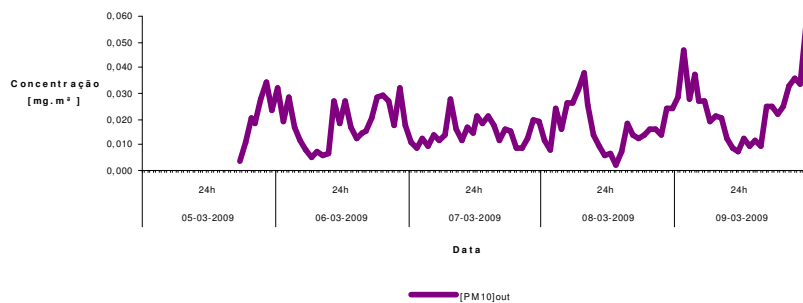


Figura 65. Concentração das PM10 no exterior.

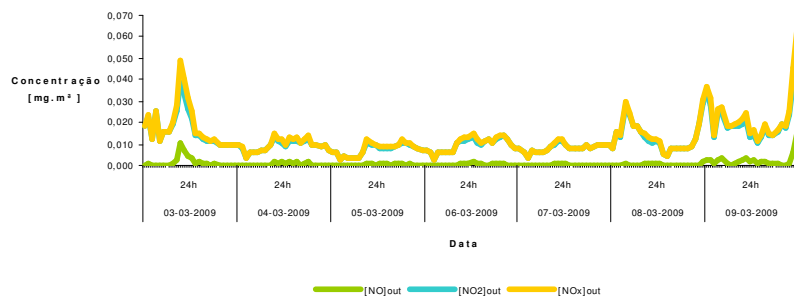


Figura 66. Concentração dos óxidos de azoto no exterior.

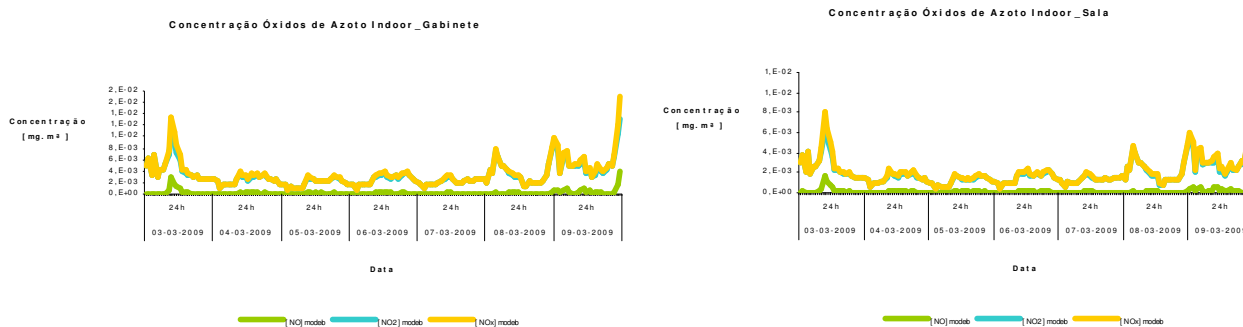


Figura 67. Transporte de óxidos de azoto do exterior para o exterior.